



## MÁSTER CONSTRUCCION AVANZADA EN LA EDIFICACION TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

HORMIGÓN ARQUITECTÓNICO DE ALTAS PRESTACIONES  
CON INCORPORACIÓN DE ADICIONES PUZOLÁNICAS.

DIEGO TAMAYO REVELO

## **RESUMEN:**

Con el presente estudio se pretende mejorar las características y propiedades del hormigón arquitectónico de altas prestaciones mediante adiciones puzolánicas para su uso en elementos prefabricados de hormigón.

Las puzolanas artificiales añadidas serán las siguientes:

- **Microsílice**
- **Nanosílice**
- **Centrilit NC II**

Se prepararán probetas de hormigón arquitectónico de altas prestaciones con su correspondiente adición puzolánica para ensayarlas a diferentes edades, 3, 7 y 28 días.

Con el resultado se determinarán propiedades físicas y durabilidad, además se las comparara con las propiedades de un hormigón arquitectónico sin adiciones.

Adicionalmente se ensayará la sustitución de cemento por puzolanas con el fin de analizar su comportamiento mecánico.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>6</b>
1.1	PREFABRICADOS DE HORMIGON ARQUITECTONICO DE ALTAS PRESTACIONES.....	6
1.2	ANALISIS DE REFERENTES:.....	7
1.3	ADICIONES .....	9
1.4	MATERIALES NANOMETRICOS:.....	10
<b>2</b>	<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>11</b>
2.1	MATERIALES .....	12
2.2	PLAN DE ENSAYOS:.....	23
2.3	DOSIFICACIONES:.....	16
2.4	EQUIPO DE LABORATORIO:.....	18
2.5	EQUIPO DE MEDICIÓN MECÁNICO:.....	20
<b>3</b>	<b>PROCEDIMIENTO .....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>METODOS DE ENSAYO MECANICO:.....</b>	<b>24</b>
4.1	FLEXIÓN:.....	24
4.2	COMPRESIÓN.....	24
<b>5</b>	<b>METODOS DE ENSAYO FISICO .....</b>	<b>25</b>
5.1	POROSIDAD:.....	25
5.1.1	Medición del peso seco:.....	25
5.1.2	Medición del peso tras saturación:.....	26
5.1.3	Medición de peso hidrostático.....	26
5.2	ABSORCIÓN CAPILAR:.....	27
5.3	DESORCIÓN.....	28
5.4	ENSAYO PARA EVALUAR LA CRISTALIZACIÓN DE SALES .....	28
<b>6</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>29</b>
6.1	RESULTADOS MECÁNICOS OBTENIDOS.....	29
6.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS MECÁNICOS:.....	32
6.3	RESULTADOS PROPIEDADES FÍSICAS OBTENIDOS: .....	38
6.3.1	Porosidad:.....	38
6.3.2	Desorción:.....	40
6.3.3	Absorción Capilar.....	44
6.4	RESULTADOS ANÁLISIS QUÍMICO (CRISTALIZACIÓN DE SALES): .....	47
6.5	ANÁLISIS SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR ADICIONES PUZOLÁNICAS:.....	50
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>53</b>

4	Hormigón Arquitectónico de altas prestaciones con incorporación de adiciones puzolánicas	
8	BIBLIOGRAFÍA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
9	ANEXOS: .....	58



## ÍNDICE

<i>Tabla 1: Numero de briquetas requeridas .....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2: Numero de briquetas a realizar .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3: Dosificación hormigón origen. ....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 4: Dosificación hormigón con microsílíce.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 5: Dosificación hormigón con centrilit nc. ....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 6: Dosificación hormigón con nanosílíce .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 7: Dosificación hormigón referencia. ....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 8: valores obtenidos del ensayo/ hormigón referencia.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 9: valores obtenidos del ensayo/ hormigón + microsílíce.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 10: valores obtenidos del ensayo/ hormigón + Centrilit nc.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 11: valores obtenidos del ensayo/ hormigón + nanosílíce .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 12: Resultados de medición de pesos .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 13: % de porosidad. ....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 14: Dosificación del hormigón arquitectónico original.....</i>	<i>50</i>

## **1 ESTADO DEL ARTE.**

### **1.1 PREFABRICADOS DE HORMIGON ARQUITECTONICO DE ALTAS PRESTACIONES.**

Son elementos de hormigón industrializados, de diferentes tamaños, pesos y formas, los cuales son elaborados en fábricas para luego ser transportados y colocados en obra.

Se considera hormigón arquitectónico de altas prestaciones al hormigón que reúne diversas cualidades y características superiores a las del hormigón tradicional.

Dicho hormigón posee compuestos y aditivos que proporcionan mayor durabilidad, mayor trabajabilidad en fresco y mejor comportamiento en estado sólido.

Sus componentes como los aditivos superplastificantes, y su relación agua / cemento baja permiten generar hormigones con altas resistencias, su composición permite obtener hormigones más duraderos gracias a su baja porosidad.

Según el artículo Hormigón de altas prestaciones [1] la principal característica es su alta compacidad, con la cual este hormigón adquiere gran comportamiento mecánico, resistente a la compresión, tracción y al esfuerzo cortante, incluso la resistencia al desgaste por abrasión.

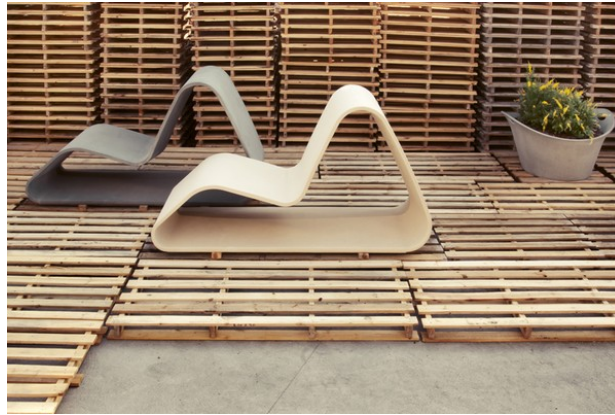
Brinda mayor durabilidad, al tener menor permeabilidad genera mayor protección para la corrosión de armaduras.

No existe una normativa específica para hormigones arquitectónicos de altas prestaciones por lo cual se analiza la Normativa UNE-EN 15191:2009 Productos prefabricados de hormigón, Clasificación de prestaciones del hormigón reforzado con fibra de vidrio. En la cual se analizan las formulaciones y procesos de los GRC (Glassfibre Reinforced Concrete).

## 1.2 ANALISIS DE REFERENTES:

La elaboración de elementos prefabricados de hormigón arquitectónico altas prestaciones permite generar innovadores diseños, la eliminación de armaduras de acero permite formar elementos ligeros con pequeños espesores.

Con los moldes apropiados se consigue formar desde las más sencillas formas hasta las más complejas, geometrías curvilíneas o ángulos rectos, lo cual permite a los arquitectos desarrollar su máxima creatividad en sus proyectos.



*Figura 2: Mobiliario Escofet / Fuente: Construmat*

El proyecto UHPC Escofet Slimconcrete [2] fue elaborado con hormigón arquitectónico altas prestaciones representando una gran innovación, representa funcionalidad y diseño mediante mobiliario urbano.

Fue un proyecto valorado gracias a las prestaciones del hormigón arquitectónico, en cuanto a durabilidad, esbeltez y resistencia en el concurso **Beyond Building Barcelona Construmat** del 2015. [3]

Es utilizado para elaborar elementos de gran complejidad en proyectos arquitectónicos, un claro ejemplo es la obra del colegio Paul Langevin en Elna – Francia el cual emplea un envolvente de elementos prefabricados de hormigón altas prestaciones.

Dicha envolvente posee una particular geometría que asimila la forma de una tela araña, que genera un espacio abierto con entradas de aire y luz.

Al ser este un elemento entrecortado (no continuo) el hormigón requiere más exigencias que un cerramiento convencional.

La envolvente está compuesta por elementos verticales y horizontales, las piezas horizontales esta dispuestas a manera de cubierta, generando un espacio de luz y sombras muy interesante y practico, permitiendo la entrada de luz y corriente de aire.



*Figura 3: cerramiento Colegio Paul Langevin*



*Figura 4: cubierta Colegio Paul Langevin*

Las dimensiones de los paneles es de 6 x 2 metros, es decir piezas grandes que están apoyadas en dos puntos, generando grandes luces.

La forma de las piezas de gran complejidad, su posición y ubicación, los tiempos de montaje requería garantizar un hormigón capaz de satisfacer todos los requerimientos.

Por ello se fabricaron las piezas reforzadas con fibra de vidrio alcalino resistente, con gran resistencia mecánica tanto a flexión y compresión, con alta resistencia inicial para su pronta puesta en obra.

La composición de sus materiales garantiza un acabado limpio para responder una excelente estética en cada pieza.

### 1.3 ADICIONES

Se los llama adiciones a los materiales ya sean inorgánicos o puzolánicos que pueden añadirse al cemento u hormigón con el objetivo de mejorar algunas características físicas o químicas.

Puede añadirse como complemento de la mezcla o puede ser utilizado como sustitución de un componente de dicha mezcla.

Las adiciones se dividen en activas e inactivas.

- Las inactivas funcionan como de relleno, estas no mejoran las propiedades de la mezcla. Pueden ser utilizadas como masa para aumentar volúmenes de producción.
- Las activas son consideradas a las que reaccionan con la materia base para incrementar o variar sus propiedades. Las más comunes como adiciones de mortero u hormigón son las puzolánicas.

#### **Adiciones puzolánicas**

Según Lurdes Laura Morejón Salup. (2015) [4]. Se conoce como puzolanas a los materiales de carácter silíceo o silíceo aluminoso, de tamaños muy pequeños y amorfos, los cuales al reaccionan con la cal libre del cemento y el agua formando silicatos cálcicos hidratados, lo cual cambia sus propiedades notablemente.

La propiedad puzolánica es la capacidad de reaccionar en la presencia de agua con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para establecer compuestos cementantes.

Las puzolanas no pueden reaccionar por sí mismas, necesitan mezclarse para adquirir propiedades cementantes.

Existen dos tipos de puzolanas las naturales y las artificiales.

- **Puzolanas naturales**  
Son cenizas volcánicas de erupciones recientes, tufas o tobas volcánicas, zeolitas o diatomitas (rocas sedimentarias de baja densidad) y esqueletos de animales.
- **Puzolanas artificiales**  
Las puzolanas artificiales son desperdicios de procesos agrícolas e industriales. Entre ellas Humo de sílice, cenizas de cascarilla de arroz, metacaolín, escorias de alto horno. Muchas de estas son consideradas nanométricas.

#### **1.4 MATERIALES NANOMETRICOS:**

Para entender a los materiales nanométricos es necesario hablar de la nanotecnología un término introducido por Richard Fynman en la conferencia "There's Plenty of room at the Bottom"(1959) [5] en la cual genera ideas acerca de que la materia a escala extremadamente pequeña era posible.

La nanotecnología se puede definir como el control de la materia en ordenes de magnitud de 1 a 100 nanómetros. Para que los materiales puedan alcanzar estas características se ha manipulado la materia a escalas muy pequeñas incapaces de ver para el ojo humano.

Actualmente la nanotecnología ha permitido la fabricación de materiales con funciones y características completamente nuevas.

Según el artículo Nanotecnología, [6] los compuestos más utilizados son silicatos, carburos, nitruros, óxidos, boruros, seleniuros, telurios, sulfuros, haluros, aleaciones metálicas, metales, polímeros orgánicos y materiales compuestos. En partículas de hasta 100 nm. de diámetro, fibras con diámetros inferiores a 100 nm. laminas delgadas de espesor inferior a 100 nm

Su campo de aplicación es amplio en cualquier industria, todas sus aplicaciones giran en torno al perfeccionamiento de materiales existentes o a la creación de nuevos materiales.

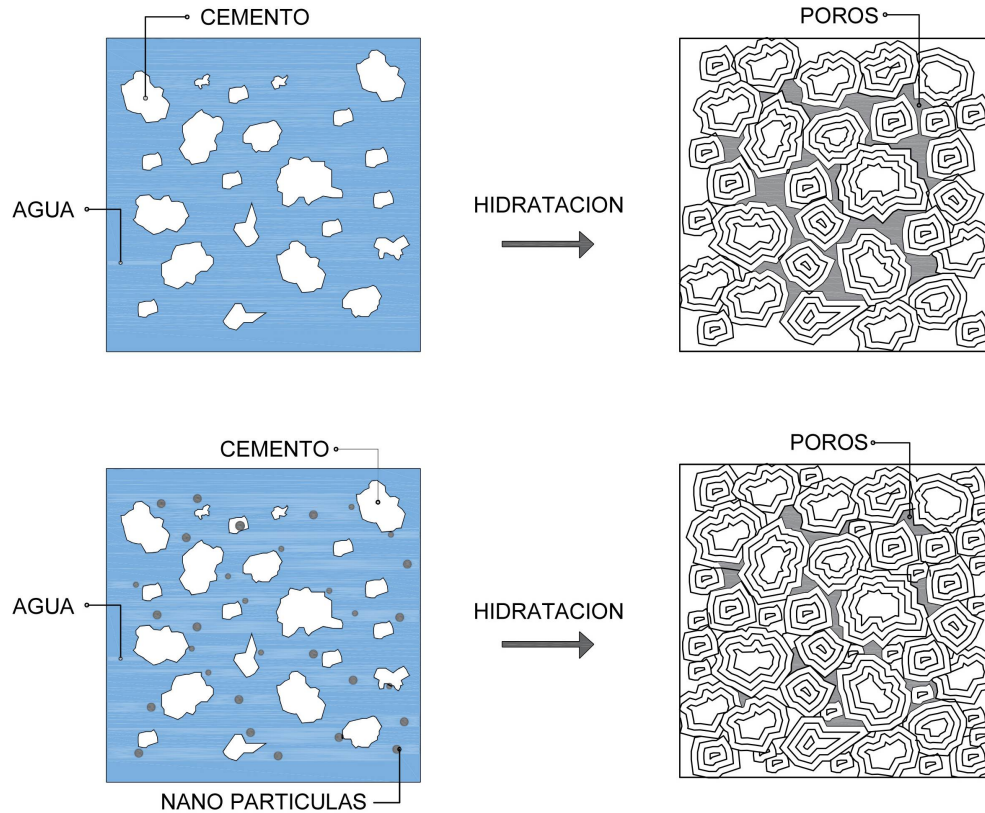
En el campo de la construcción la nanotecnología permitirá una nueva generación de materiales, entre ellos el hormigón, cuyas nuevas prestaciones generadas por las nanopartículas creará una nueva gama de propiedades.

#### **Efectos de los nanomateriales en el hormigón:**

La aplicación de nanopartículas en el hormigón influye de manera importante según Cristina Salgado Fernández (2010), [7] las partículas rellenan huecos entre los granos del cemento y operan como núcleos activos que aumentan la hidratación del cemento al incrementar la superficie específica.

Según Alcázar Marín 2012 [8] al rellenar los huecos se crea una matriz más densa por lo que disminuye la porosidad.

La dimensión de las partículas reaccionando con el cemento son capaces de crear microestructuras más densas y menos porosas que las de un hormigón tradicional



*Figura 6: Hidratación del cemento*

Según P. Kumar Metha 2001 [9] Existen factores que influyen directamente en la resistencia del hormigón y los morteros, entre ellos la porosidad, (cantidad de huecos en el volumen) poros mayores de 50  $\mu\text{m}$  perjudican notablemente la resistencia.

## 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Para la fase experimental se preparan briquetas de hormigón arquitectónico de altas prestaciones con su correspondiente adición puzolánica para estudiarlo a diferentes edades. Las puzolanas artificiales añadidas serán las siguientes:

- **Microsílice**
- **Nanosílice**
- **Centrilit NC**

Adicionalmente se prepara briquetas de hormigón arquitectónico de referencia con el objetivo de comparar los resultados con las briquetas con adiciones puzolánicas ya mencionadas.

Para la fase de desarrollo la empresa MC Spain contribuye con materiales y una orientación en cuanto a dosificaciones con las cuales los fabricantes desarrollan prefabricados de hormigones de altas prestaciones.

Además, se prepararán briquetas específicas para estudiar la posible utilización de estas puzolanas como sustitución de cemento en las mezclas para la elaboración de prefabricados.

Se plantea la sustitución del 10% de cemento de la dosificación original, para examinar su comportamiento mecánico.

Actualmente no existe una normativa en particular para elementos prefabricados de hormigones de altas prestaciones, se intenta la máxima aproximación a la norma EN 197-1 prefabricados de hormigón. a pesar de que la normativa se enfoca en hormigones con áridos gruesos.

## 2.1 MATERIALES

### Cemento:

Material inorgánico que cuando se mezcla con el agua forma una pasta que fragua y se endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que después de endurecer mantiene altas resistencias.

Según el artículo Hormigones de altas prestaciones [1], se pueden emplear cementos disponibles en el mercado.

Los cementos apropiados para la fabricación son los clase I – 0 de composición química y grado de saturación uniformes con estos cualidades se certifica:

- Que los morteros posean altas resistencias
- Que no se produzcan cambios importantes en la velocidad de hidratación debidos a la variación de la superficie específica.
- Al ser cementos comerciales con 100 % de Clinker sin adiciones se puede controlar fácilmente la cantidad y calidad la incorporación de aditivos.

El cemento utilizado es el **CEMEX BL II/B-LL 42.5 R** el cual se rige a la normativa UNE 80305, como su fabricante lo indica es un producto especial para hormigones arquitectónicos, morteros y prefabricados vistos.

Según la ficha técnica del fabricante posee una alta resistencia inicial, y un alto índice de blancura además esta adicionado con caliza lo que le da al hormigón mejor compacidad y trabajabilidad.



Según las especificaciones del fabricante su composición es un 65 a 79% Clinker y un 21 al 35% Caliza LL y otro 5 % de componentes minoritarios.

El color del cemento es blanco para lograr una mejor apariencia en prefabricados vistos.

### **Árido:**

Material mineral granular adecuado para su uso en mortero u hormigón.

Según el artículo Hormigón de altas prestaciones 1, es importante utilizar áridos seleccionados en función de su naturaleza, su clasificación granulométrica y su limpieza, estos factores ayudaran a que el hormigón adquiera alta adherencia, resistencia y compacidad.

Las características que determinan su buen comportamiento son la forma y la textura superficial.

La adherencia entre la pasta de cemento y el árido depende de la textura o rugosidad superficial, además de la limpieza que estos áridos posean.

La compacidad del hormigón dependerá de la granulometría de los áridos, de la proporción de los varios tamaños y la forma que tengan estos granos.[1]

El árido utilizado es el de la empresa **ARENES BELLPUIG, AF-R-0/2-S** un árido fino, natural y sometido a un proceso de clasificación.

Se rige a la **norma** UNE EN 13043:02 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES Y MEZCLAS BITUMINOSAS: No apto para capas de rodadura

Es de granulometría fina de 2 milímetros.

Según la ficha técnica del fabricante es apto para la construcción, usos generales, mezclas y ligados bituminosos.

### **Aditivo Superplastificante:**

Es necesario la utilización de superplastificantes, que ayuden a aumentar considerablemente la trabajabilidad de la mezcla.

Estos aditivos plastificantes poseen propiedades que ayudan a dispersar las partículas de cemento.

Estos aditivos proporcionan modificaciones previstas a las propiedades iniciales y finales.

Además, generan mayor cohesión a la masa fresca sin alterar su fluidez, reduciendo la segregación de áridos.

Según el artículo Hormigones de altas prestaciones [1] con la utilización de superplastificantes se consiguen reducciones del contenido de agua del 20 al 30%.

#### 14 Hormigón Arquitectónico de altas prestaciones con incorporación de adiciones puzolánicas

---

El superplastificante utilizado es el comercializado por MC Construction Chemicals Spain, el nombre comercial es **MC-POWERFLOW 2230**, según su fabricante es un superplastificante para hormigón de altas prestaciones basado en la tecnología de polímeros MC, su composición esta reservada por el fabricante.

##### **Agua:**

Para alcanzar las mejores prestaciones es necesario disminuir al máximo la relación agua cemento, hasta conseguir utilizar únicamente el agua necesaria para la hidratación del cemento, manteniendo una buena trabajabilidad del hormigón durante la puesta en obra. Como agua de amasado se utiliza el agua del grifo.

##### **Microsílice:**

Conocido también como humo de sílice, es un producto inorgánico que se encuentra en partículas muy pequeñas y amorfas en las industrias dedicadas a la elaboración de ferro silicio y silicio metal.

La microsíllice se forma en hornos de arco eléctrico a temperaturas superiores a 2000 grados centígrados, cuando el gas SiO (producido cuando el cuarzo de alta pureza se reduce) se mezcla con el oxígeno en la parte superior del horno.

El SiO se oxida a SiO<sub>2</sub>, condensando en partículas esféricas de microsíllice.[4]

Se utiliza el microsíllice de la empresa **ELKEM**, [10] fabricante y comercializador de este producto como adición para hormigones de altas prestaciones, el microsíllice contiene un 85 a 98 % de dióxido de silicio amorfo (SiO<sub>2</sub>) en forma de partículas microscópicas.

El tamaño es tan pequeño que se lo puede comparar con las partículas del humo del cigarrillo, el diámetro promedio es de 0.10 a 0.15 micras.

La superficie específica es 100 veces la del cemento, es decir de 180.000 a 200.000 cm<sup>2</sup>/g.

El peso específico de la micro sílice es de 2.2 bajo en comparación con la mayoría de los cementos portland.

##### **Centrilit Nc:**

Es un aditivo para hormigón basado en aluminosilicatos puzolánicos, desarrollado por la empresa MC Spain. [11]

Según las especificaciones del fabricante es un material amorfo, el cual genera un sin número de prestaciones mecánicas, físicas y ambientales.

- Aumenta la resistencia del hormigón
- Mejora la homogeneidad del hormigón en estado sólido.
- Reduce la producción de cloruros.

Es un material fabricado sintéticamente, no se conocen la totalidad de sus componentes, la empresa MC Spain se reserva esta información.

Según la empresa mencionada las prestaciones del producto se deben al tamaño de las partículas, las cuales son significativamente más pequeñas que las del cemento, estas se dispersan en la composición de la pasta y rellenan las cavidades de la mezcla de cemento. Gracias a los elementos puzolánicos los cloruros se reducen, mejora su comportamiento a sustancias perjudiciales provocando mayor durabilidad.

Es un aditivo utilizado en hormigones vistos pues por su composición genera un hormigón homogéneo, logrando superficies estéticas.

Por su alta resistencia es un aditivo utilizado en tuberías de hormigón, hormigones prefabricados y proyectados.

Se encuentra en el mercado en color blanco y en estado líquido y sólido. Para el presente estudio se utiliza en polvo.

El color es blanco para no cambiar la apariencia final de los prefabricados vistos.

### **Nanosílice:**

El nanosílice es un nano aditivo en estado líquido, su aspecto es de color blanco y viscoso, como su nombre lo indica está compuesto a base de sílice.

Según la empresa fabricante **BASF**, [12] es sílice en estado líquido con partículas de tamaño nanométrico, mil veces más pequeña que la micro sílice. Es el tamaño de las partículas las que generan singulares prestaciones.

Propiedades físicas:

El tamaño de las partículas es nanométrico entre 3nm y 150 nm, es decir 100 veces más fina que las partículas del cemento.

Al ser el tamaño de las partículas nanométrico la superficie específica es muy grande lo que genera una buena plasticidad a la mezcla sin la necesidad de plastificantes.

Según Basf la densidad de la nano sílice es de 1.030 kg/m<sup>3</sup>

Tiene la propiedad de incrementar la resistencia inicial y final del hormigón en dosificaciones de 0.3 a 0.7% el peso del cemento. [4]

## 16 Hormigón Arquitectónico de altas prestaciones con incorporación de adiciones puzolánicas

---

Se utiliza la nanosílice precipitada de la empresa **BASF**, fabricada en el producto **MasterRoc MS 685** la cual se encuentra en presentación de líquido blanco.

Según las especificaciones del producto es una mezcla basada en la suspensión de nanosílice amorfa.

### 2.2 DOSIFICACIONES:

Las dosificaciones originales han sido sugeridas por la empresa MC Spain, con los cuales se fabrican prefabricados de hormigón de altas prestaciones.

El hormigón arquitectónico original posee el cemento y el árido en partes iguales.

La cantidad de aditivo superplastificante utilizado es la del 1.2 % sobre el peso del cemento.

La relación agua / cemento es de 0.22

HORMIGON ORIGEN	
Cemento	3 kg
Arena	3 kg
Agua	660 ml
Superplastificante	0.036 kg

*Tabla 1: Dosificación hormigón origen.*

Se decide sustituir la cantidad del cemento por la cantidad de adición puzolánica que se le va a añadir.

Es decir, para una sustitución del 10% de cemento se le quitaran 0.3 kg de la dosificación original y se le añaden 0.3 kg del material puzolánico a utilizar.

Mientras que la cantidad del agua y aditivo se mantienen iguales a la dosificación original.

Las proporciones empleadas son las siguientes:

HORMIGON CON MICROSILICE	
Cemento	2.7 kg
Arena	3 kg
Agua	660 ml
Superplastificante	0.036 kg
Microsílice	0.3 kg

*Tabla 2: Dosificación hormigón con microsílice*

HORMIGON CON CENTRILIT NC	
Cemento	2.7 kg
Arena	3 kg
Agua	660 ml
Superplastificante	0.036 kg
Centrilite nc	0.3 kg

Tabla 3: Dosificación hormigón con centrilite nc.

Para la adición de Nanosílice la dosificación cambia, por estar en estado líquido requiere menor cantidad de agua del grifo.

HORMIGON CON NANOSILICE	
Cemento	2.7 kg
Arena	3 kg
Agua	600 ml
Superplastificante	0.036 kg
Nanosílice	300 ml

Tabla 4: Dosificación hormigón con nanosílice

A fin de evaluar y comparar el efecto de las diferentes adiciones también se preparará una formulación con la misma cantidad de cemento, áridos, agua y plastificantes que poseen las mezclas con adiciones y se le incorporará una adición inerte. Dicha formulación se la denominará hormigón referencia.

Dicha adición es inerte (no puzolánica)

HORMIGON REFERENCIA	
Cemento	2.7 kg
Arena	3 kg
Agua	660 ml
Superplastificante	0.036 kg
Adición caliza	0.3 kg

Tabla 5: Dosificación hormigón referencia.

### 2.3 EQUIPO DE LABORATORIO:

Para realizar las diferentes amasadas se utilizó el equipo del laboratorio de materiales de la EPSEB, se procura utilizar el equipo óptimo para cumplir con los lineamientos de la normativa para la elaboración de probetas UNE-EN 1015-11:2000



*Figura 7: Mezcladora industrial*

#### **Mezcladora industrial.**

Por la consistencia y plasticidad de la mezcla no se necesita un equipo mayor, la mezcladora industrial es capaz de mezclar correctamente áridos finos.



*Figura 8: Mesa de sacudidas.*

#### **Mesa de sacudidas:**

Un tablero circular con medición radial cada cm, permite conocer la consistencia y plasticidad de la mezcla, el contenedor del hormigón es un anillo de bronce de base 110mm de base y 70mm en el radio superior, siguiendo la normativa UNE-EN 1015-3



*Figura 9: Balanza*

#### **Balanza de precisión:**

Balanza **GRAM HGS-3000** capacidad máxima de 3000 gramos, sensibilidad de 0.1 gramo.

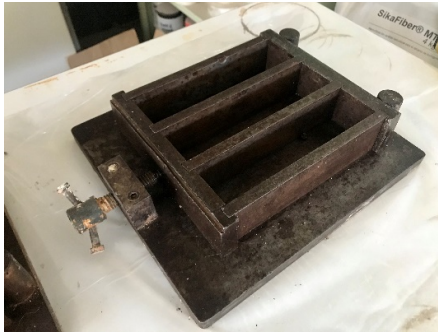


Figura 10: Briquetas de acero.

**Briquetas de acero:**

De dimensiones 4x4x16cm las probetas siguen la norma UNE 80-101-88 para probetas de flexión y compresión.



Figura 11: Tanque de aire al vacío.

**Tanque de aire al vacío:**

Utilizado para ensayos de peso saturado, se encuentra conectado a un tanque de cristal lleno de agua destilada, y a un motor el cual absorbe el aire del tanque.



Figura 12: Cortadora mecánico

**Cortadora mecánica:**

Divide probetas de gran resistencia por medio de un disco de diamante segmentado.



Figura 13: Horno de secado.

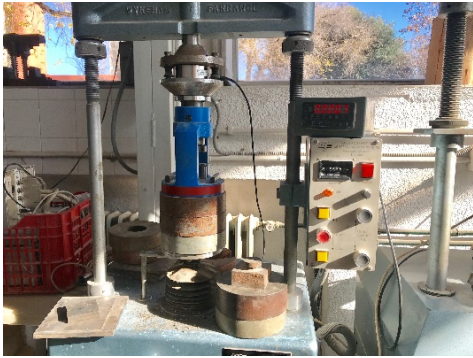
**Horno de secado:**

Permite el secado de piezas a temperaturas requeridas.

Marca **SELECTA**

Proveedor: Eurocomercial S.A.

## 2.4 EQUIPO DE MEDICIÓN MECÁNICO:



*Figura 14: Equipo medición flexión.*

### **Flexión:**

Para realizar la medición a flexión mediante ruptura, se utiliza la maquina **WYKEHAM FARRANCE** de capacidad máxima 5 toneladas, y una precisión de 1 kilo, establecida por la norma UNE-EN 1015-1115-11:2000



*Figura 15: Equipo medición compresión*

### **Compresión:**

Para realizar la medición a compresión mediante ruptura se utiliza la maquina **SUZPECAR** de capacidad máxima 200 toneladas, y una precisión de 100 kilos, establecido por la norma UNE-EN 1015-11

## 3 PROCEDIMIENTO

El procedimiento se lo realiza en el laboratorio de materiales de la EPSEB.

Los materiales sólidos tales como cemento, arena y adiciones puzolánicas en polvo son pesados utilizando la balanza de precisión, posteriormente se mezclan entre sí en un recipiente.

Los líquidos tales como el agua y superplastificante son mezclados entre sí, previamente la amasada.

Una vez mezclados sólidos y líquidos de manera independiente se inicia el proceso de amasado.



### Proceso de amasado

- Se limpia la mezcladora industrial de posibles residuos que puedan cambiar la composición de la mezcla.
- Se humecta la superficie interior de la mezcladora. Para evitar que el material sólido se adhiera a las paredes de la mezcladora.
- Se coloca un 50 % de líquidos sobre la mezcladora, posteriormente se van colocando los sólidos lentamente mientras la mezcladora está en marcha.
- Posteriormente se va colocando lentamente el agua restante, para conseguir que los sólidos se hidraten por completo.



*Figura 16: Amasado general.*

### Mesa de sacudidas:

La mesa de sacudidas se utilizó para conocer la consistencia y plasticidad de la mezcla.

Al realizar 2 amasadas por cada adición es necesario comparar la consistencia entre ambas.

De esta manera se confirma que las mezclas sean homogéneas.

El proceso que se realizó fue el siguiente:

- Se coloca el cono de bronce en el centro de la mesa de sacudidas con gran precisión puesto que de esto depende el correcto deslizamiento de la mezcla.
- Se vierte la mezcla sobre el cono de bronce, hasta que esté completamente lleno, se retira el exceso, por medio de una paleta, de esta manera se determina la misma cantidad de mezcla en todas las amasadas.
- Se retira el cono de bronce verticalmente permitiendo que la mezcla se deslice sobre la mesa.

## 22 Hormigón Arquitectónico de altas prestaciones con incorporación de adiciones puzolánicas

---

- Debido a la plasticidad del material no se realizó sacudidas, ya que por si solo se deslizo totalmente.
- Se mide en cm el diámetro que la mezcla se desplazó y se comparan los desplazamientos entre amasadas.

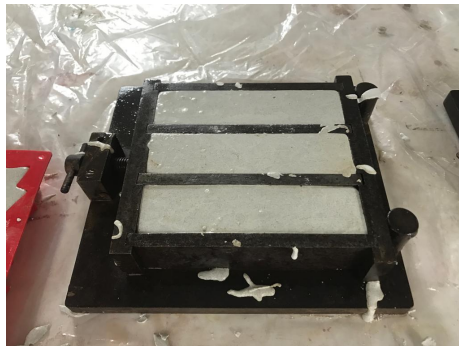


*Figura 17: mezcla sobre mesa de sacudidas.*

### **Proceso de llenado de probetas**

Previamente al llenado las briquetas deben estar limpias y ligeramente lubricadas con aceite para evitar que el material se adhiera y el desmolde sea fácil.

- Se vierte la mezcla sobre los moldes o briquetas de 4x4x16cm.
- Se utiliza una paleta de acero para nivelar la mezcla sobre el molde y retirar los excesos.
- Se vibra golpeando ligeramente las briquetas contra la mesa para evitar que burbujas de aire permanezcan en el interior de la mezcla.
- Se realiza el mismo proceso en todas las briquetas.
- Para finalizar se coloca un plástico transparente sobre las briquetas hasta la hora de desmolde para evitar que las piezas pierdan agua.



*Figura 18: llenado de briquetas*

### **Proceso de desmolde:**

El proceso de desmolde se realizó 24 horas después de la amasada, sin embargo, este proceso se puede realizar a las 8 horas.

- Se desarma las briquetas hasta conseguir que las piezas salgan fácilmente.
- Se procede a etiquetar las piezas.
- Posteriormente estas son almacenadas en una cámara húmeda hasta el día de su ensayo.



Figura 19: probetas desmoldadas y etiquetadas

### 3.1 PLAN DE ENSAYOS:

#### Determinación de propiedades mecánicas:

- Resistencia a la flexión EN 196-1
- Resistencia a la compresión EN 196-1

Para la determinar la resistencia a flexión y compresión se realizan ensayos de ruptura, se utilizan briquetas de 4x4x16 cm. Las cuales son ensayadas a tres edades 3, 7 y 28 días.

Para realizar ensayos Físicos se utiliza las mismas briquetas.

El mínimo de briquetas requeridas es de 4 por cada adición distribuidas de esta manera:

# de Briquetas requeridas	Referencia	Microsílice	Nanosílice	Centrilit nc
Ensayos Mecánicos	3	3	3	3
Ensayos Físicos	1	1	1	1

Tabla 6: Numero de briquetas requeridas

Por efectos de capacidad del equipo de mezclado se realizan 2 amasadas diferentes para cada adición a ensayar, intentando que la mezcla entre las dos sea lo más homogénea posible.

Por cada amasada se logran llenar 3 briquetas, por lo que con las 2 amasadas se consiguen 6 briquetas, las briquetas excedentes servirán como suplentes en caso de requerirlas.

	Referencia		Microsílice		Nanosílice		Centrilit nc	
Amasada #	A1	A2	B3	B4	C5	C6	D7	D8
# de Briquetas en cada amasado	3	3	3	3	3	3	3	3
# briquetas obtenidas	6		6		6		6	

Tabla 7: Numero de briquetas a realizar

Adicionalmente se realizan 1 amasada para el ensayo de sustitución del cemento del 10%. Con lo cual se realizaron en total 9 amasadas obteniendo 27 briquetas.

#### 4 METODOS DE ENSAYO MECANICO:

##### 4.1 Flexión:

Este ensayo a rotura se lo realiza en la maquina **WYKEHAM FARRANCE**

Se selecciona 3 probetas por cada adición o material a ensayar.

Se colocan las probetas en el centro, en el eje transversal, a 8cm de los laterales.

La distancia entre los soportes inferiores es de 10cm.

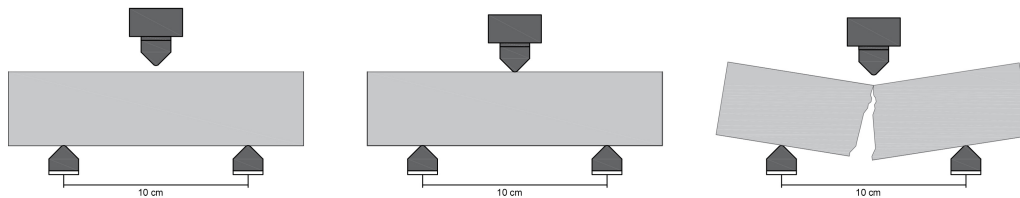


Figura 20: ensayo a flexión

Se enciende el medidor, colocándolo en cero, y configurándolo para que guarde el mayor esfuerzo alcanzado.

Se enciende la maquina a flexión a la menor velocidad posible, con ello se garantiza una medición más precisa.

Finalmente, después de la ruptura se toman datos para ser analizados.

Este proceso se repite a los 3, 7 y 28 días a partir del día de su fabricación.

##### 4.2 Compresión

Este ensayo de rotura se lo realiza con la maquina **SUZPECAR**

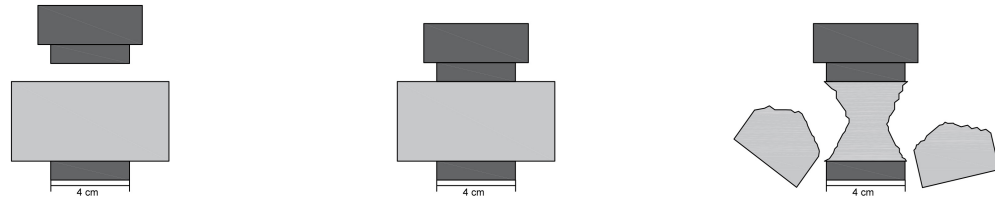
Se toman las partes restantes de las probetas que fueron sometidas al ensayo de flexión para luego ensayarlas a compresión.

La base donde se realizará el ensayo tiene una dimensión de 4 x 4 cm.

Se enciende el contador, se lo coloca en cero y se enciende la memoria para guardar los mayores esfuerzos alcanzados.

Se pone en marcha la maquina hasta el momento de ruptura.

Finalmente se toman datos y se repite el proceso con todas las piezas a ensayar.



*Figura 21: ensayo a compresión*

## 5 METODOS DE ENSAYO FISICO

### 5.1 Porosidad:

Este ensayo se rige la norma UNE 83980, Determinación de absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón.

Según la norma la temperatura de la sala o laboratorio debe ser de  $20 \pm 2$  °C y una humedad relativa menor al 45 %, en este caso la temperatura estuvo a una temperatura de 21 °C y una humedad relativa del 35%

Para determinar la porosidad de cada probeta es necesario la medición del peso seco, el peso saturado y el peso hidrostático.

#### 5.1.1 Medición del peso seco:

Para la determinación del peso seco se lo obtiene mediante el acondicionamiento de la probeta, se colocó la probeta en el horno a 100 °C durante aproximadamente 48 horas. Posteriormente se determina el peso de cada probeta.



*Figura 22: Horno de secado.*

### 5.1.2 Medición del peso tras saturación:

La medición del peso de saturación se lo obtuvo mediante el vacío, la probeta se coloca en un recipiente de vidrio cerrado al vacío, posterior se disminuye la presión gradualmente hasta  $2.0 \pm 0.7$  kPa.

Se mantiene esa presión por 2 horas para eliminar el aire contenido en los poros abiertos de la probeta.

Posteriormente se coloca agua desmineralizada gradualmente en el recipiente de vidrio hasta que el agua cubra las probetas totalmente.

Cuando las probetas están sumergidas se reestablece la presión atmosférica y se deja la probeta bajo el agua  $24 \pm 2$  horas.

Por último, se retira las probetas del recipiente, se elimina el exceso de agua superficial con una tela húmeda y se toma su peso en la balanza.



*Figura 23: Tanque de aire al vacío.*

### 5.1.3 Medición de peso hidrostático

Se coloca una cesta de alambre enganchada a un trípode estático, dicha cesta se encuentra sumergida y suspendida bajo el agua en un recipiente, de tal manera que la cesta no toque ni las paredes ni el fondo del depósito, se coloca la balanza en cero y se procede a colocar la probeta dentro de la cesta de alambre sumergida bajo el agua. Posteriormente se determina el peso de la probeta.



*Figura 24: Amasado general.*

El cálculo del porcentaje de porosidad se determina mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ Porosidad} = \frac{a1 - a2}{a1 - a3} \times 100$$

- a1. Peso de la probeta tras saturación
- a2. Peso seco de la probeta
- a3. Peso hidrostático

## 5.2 Absorción capilar:

El ensayo tiene como objetivo determinar el coeficiente de succión capilar de las probetas de hormigón del presente estudio.

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad se determina mediante la medición periódica de la ganancia de peso de las probetas a ensayar.

El método de ensayo es el siguiente:

- Las probetas deben estar acondicionadas previamente, deben estar secas en horno a 100 °C por un periodo de 48 horas, para determinar su peso en seco.
- En un contenedor vacío se coloca una malla plástica a manera de apoyo para separar el contenedor y la probeta.
- Se llena el recipiente de agua hasta que esta cubra 1cm a la probeta. Este nivel debe mantenerse constante durante todo el ensayo.
- Se colocan las probetas y se pone en marcha el cronometro, a partir de ello se inicia el pesaje de las probetas según los tiempos establecidos, a intervalos de números naturales al cuadrado. (1<sup>2</sup>; 2<sup>2</sup>; 3<sup>2</sup>; 4<sup>2</sup>; 5<sup>2</sup>; 6<sup>2</sup>) etc.
- El proceso termina cuando las probetas dejen de ganar peso.



Figura 25: Amasado general.



### 5.3 Desorción

El objetivo del ensayo es analizar la pérdida de agua de una probeta que se encuentra en estado de saturación.

El método del ensayo es el siguiente:

- Las probetas deben estar en estado de saturación de agua, por lo cual es necesario que estas se hayan sometido al proceso de saturación al vacío detallado en este documento
- En un recipiente vacío se coloca una malla plástica como aislante entre el contenedor y la probeta.
- Se colocan las diferentes probetas sobre la malla y se pone en marcha el cronometro, a partir de ello inicia el proceso de pesaje en tiempos con intervalos de números naturales al cuadrado. ( $1^2$ ;  $2^2$ ;  $3^2$ ;  $4^2$ ;  $5^2$ ;  $6^2$ ) etc.



*Figura 26: Amasado general.*

### 5.4 Ensayo para evaluar la cristalización de sales

El ensayo se realiza con el objetivo de analizar el comportamiento de cada adición puzolánica con la presencia de sulfato.

- En un recipiente vacío se coloca una malla plástica como base donde serán colocadas las probetas.
- Se añade un litro de agua caliente por cada 72 gramos de sulfato, se remueve hasta que el sulfato se disuelva y posteriormente se colocan las probetas.
- Se realiza una muestra fotográfica a las 24 horas y pasados los 15 días, para observar la evolución del ensayo, y la reacción que este tiene en cada probeta.





Figura 27: Ensayo cristalización de sales.

## 6 RESULTADOS.

### 6.1 Resultados mecánicos obtenidos

De cada adición ensayada se realizaron dos rupturas de amasadas diferentes con el objetivo de eliminar posibles errores y lograr los resultados más fiables.

Después de los ensayos mecánicos destructivos tanto a flexión como compresión a 3,7 y 28 días, se obtuvieron los valores resultantes, los cuales se encuentran en kilogramos unidad en la cual las máquinas de flexión y compresión proporcionan.

Estos resultados son promediados y transformados a mega pascales (MPa) mediante las siguientes formulas:

Flexión:

$$\sigma \text{ Flexión} = \frac{1.5 \times (P - kg \times 9.8) \times longitud}{b \times h^2}$$

$$\sigma \text{ Flexión} = \frac{1.5 \times (P - kg \times 9.8) \times 100 \text{ mm}}{40 \times 40 \times 40}$$

Compresión:

$$\sigma \text{ Compresión} = \frac{P - kg \times 9.8}{Superficie (mm)}$$

$$\sigma \text{ Compresión} = \frac{P - kg \times 9.8}{40 \times 40}$$

Hormigón Referencia:

Hormigón Referencia (A)	<b>3 DIAS</b>	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	5.3	61.5
	<b>7 DIAS</b>	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	6.8	69.7
	<b>28 DIAS</b>	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	9.4	79.9

Tabla 8: valores obtenidos del ensayo/ hormigón referencia.

Hormigón + adición de microsílíce.

Hormigón + Microsílíce (B)	<b>3 DIAS</b>	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	5.6	69.8
	<b>7 DIAS</b>	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	7.4	78.5
	<b>28 DIAS</b>	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	10.6	80.4

Tabla 9: valores obtenidos del ensayo/ hormigón + microsílíce

Hormigón + adición de Centrilit nc.

Hormigón + Centrilit NC (C).	3 DIAS	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	6.7	64.1
	7 DIAS	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	7.6	69.9
	28 DIAS	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	11.7	88.3

Tabla 10: valores obtenidos del ensayo/ hormigón + Centrilit nc.

Hormigón + adición de Nanosílice

Hormigón + Nanosílice (D)	3 DIAS	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	7.0	60.9
	7 DIAS	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	9.8	68.4
	28 DIAS	
	FLEXION (MPa)	COMPRESION (MPa)
	11.9	84.4

Tabla 11: valores obtenidos del ensayo/ hormigón + nanosílice

## 6.2 Análisis de resultados mecánicos:

Después de obtener los resultados en Mega Pascales (Mpa) y promediarlos, se procede a realizar tablas comparativas para analizar el comportamiento de cada material a las diferentes edades ensayadas:

### Hormigón Referencia:

Resistencia a flexión y compresión en 3, 7 y 28 días.

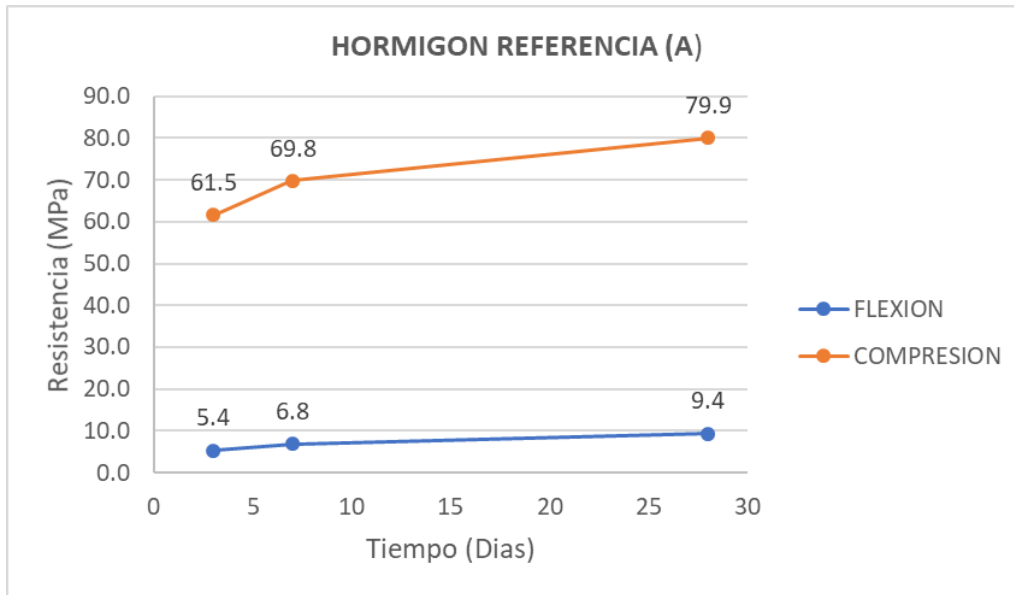


Figura 27: Hormigón Referencia / Resistencia – tiempo

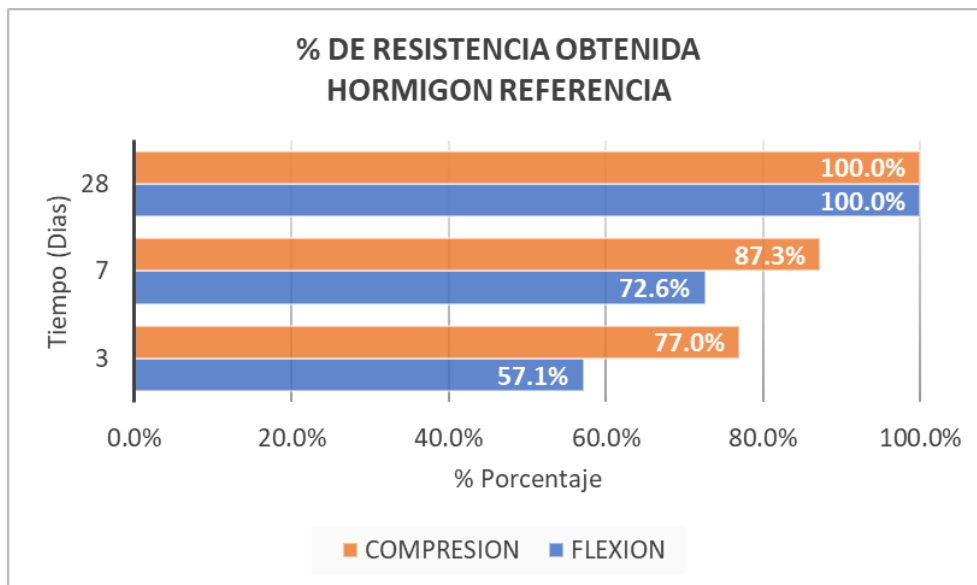


Figura 28: Hormigón referencia / % de resistencia obtenida

Los resultados del hormigón referencia responden a la teoría, poseen gran resistencia inicial a flexión y compresión, han alcanzado a obtener a los 3 días el 57.1% a flexión y el 77% a compresión del total de su resistencia. Después su aumento es progresivo, obteniendo a los 7 días una resistencia de 72.6% a flexión y el 87.3% a compresión.

A los 28 días cuando han obtenido su mayor resistencia, han alcanzado los 9.4 MPa a flexión y 79.9 MPa a compresión.

#### Hormigón + microsílíce:

Resistencia a flexión y compresión en 3, 7 y 28 días.

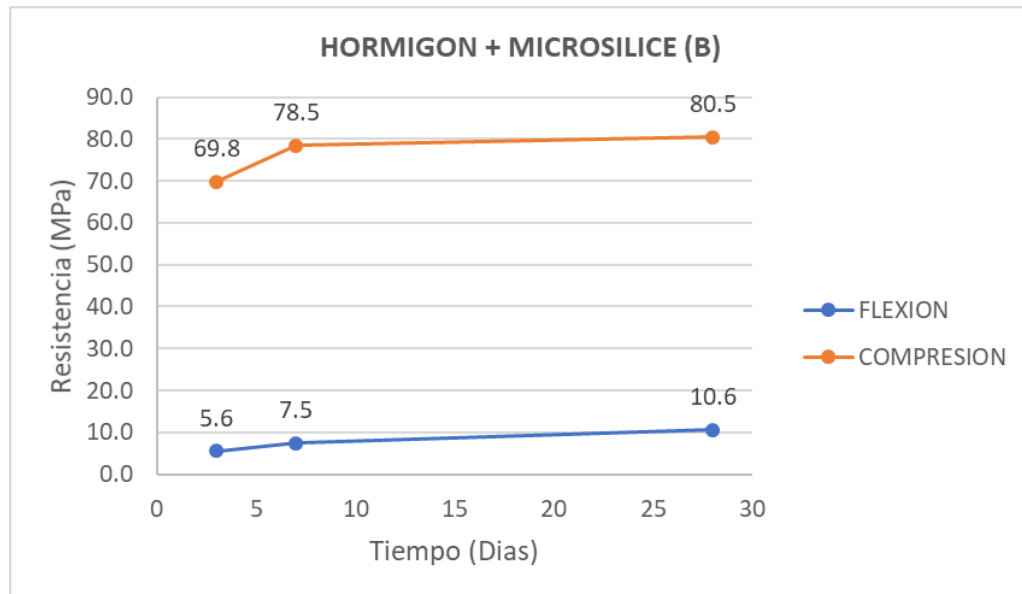


Figura 29: Hormigón + microsílíce / Resistencia – tiempo

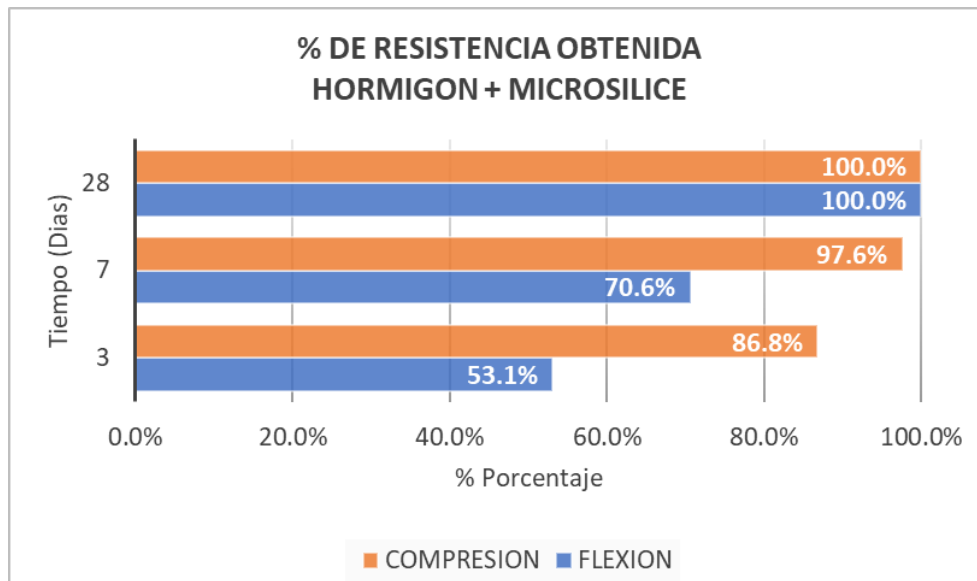


Figura 30: Hormigón + Microsílíce / % de resistencia obtenida

Los resultados del hormigón + Microsílice han obtenido altas resistencias iniciales, han alcanzado a los 3 días el 53.1% a flexión y un 86.8% a compresión, a los 7 días alcanzan a flexión el 70.6%, mientras que a compresión ha alcanzado casi el total de su resistencia un 97.6%.

A los 28 días han alcanzado gran resistencia 10.6 MPa a flexión y 80.5 MPa a compresión.

#### **Hormigón + Centrilit nc.**

Resistencia a flexión y compresión en 3, 7 y 28 días.

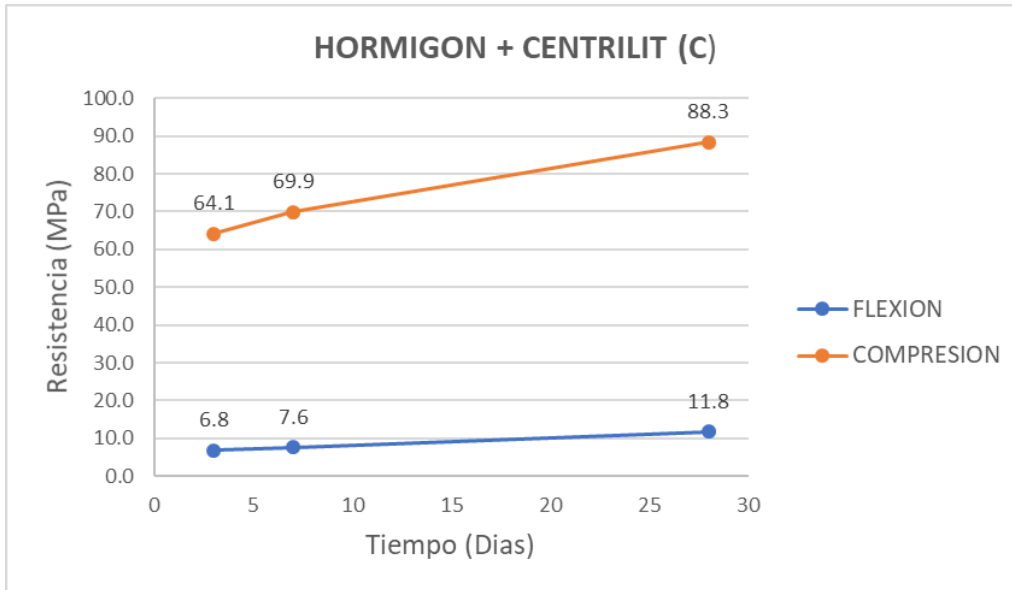


Figura 31: Hormigón + Centrilit nc. / Resistencia – tiempo

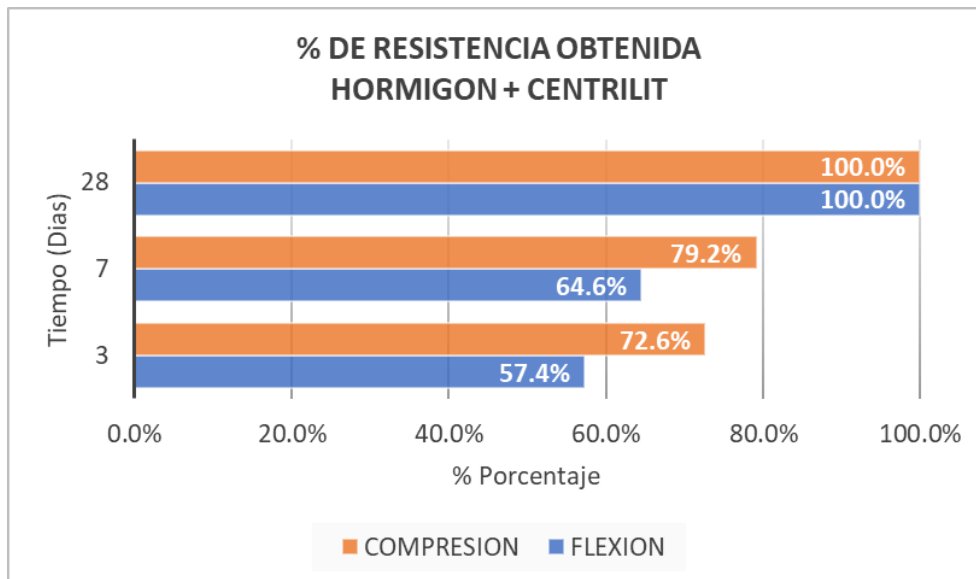


Figura 32: Hormigón + Microsílice / % de resistencia obtenida

Los resultados de hormigón + Centrilit han alcanzado igualmente altas resistencias iniciales, han obtenido a los 3 días el 57.4% a flexión y el 72.6% a compresión, a los 7 días el incremento ha sido escaso, un 64.6% a flexión y un 79.2% a compresión, posteriormente continuó ganando resistencia hasta los 28 días cuando obtuvo grandes resultados 11.8 MPa a flexión y 88.3 MPa a compresión.

#### Hormigón + Nanosílice:

Resistencia a flexión y compresión en 3, 7 y 28 días.

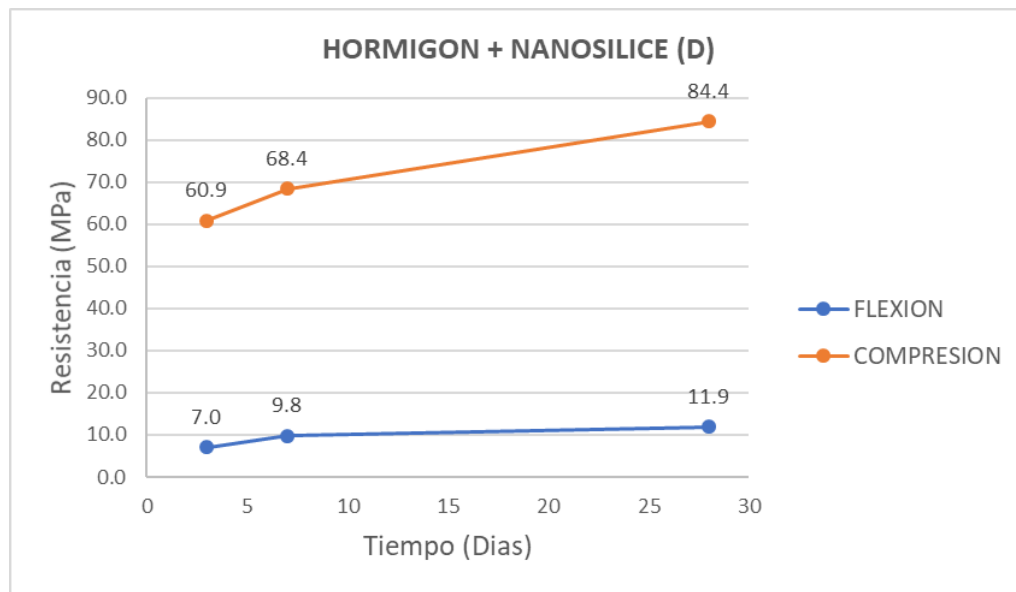


Figura 33: Hormigón + nanosílice / Resistencia - tiempo

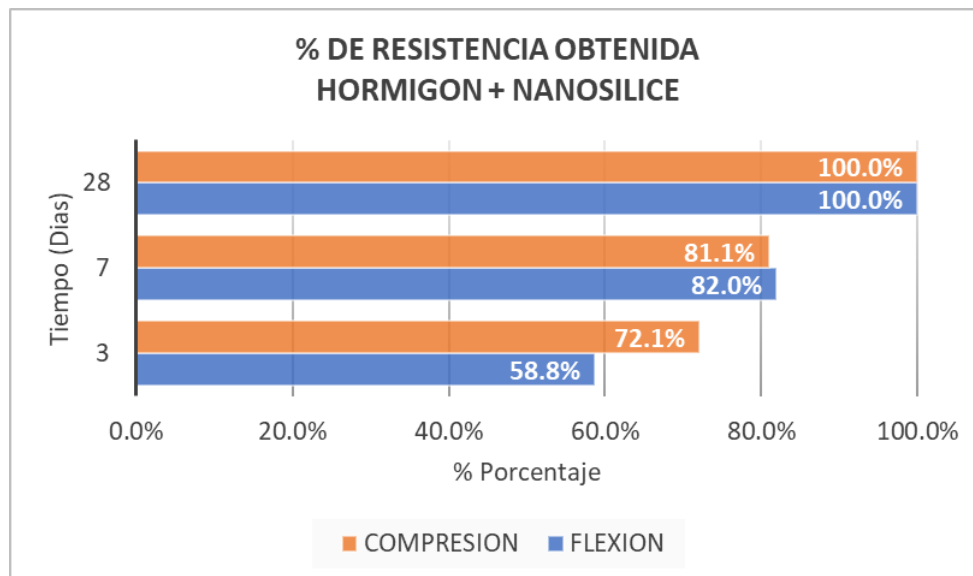


Figura 34: Hormigón + Microsílice / % de resistencia obtenida

Los resultados de Hormigón + Nanosílce han obtenido nuevamente gran resistencia inicial, a los 3 días han obtenido el 58.8% a flexión y el 72.1% a compresión, posteriormente el incremento fue progresivo, a los 7 días tanto en flexión como compresión ganaron más del 80% de su resistencia.

A los 28 días alcanzaron grandes resistencias 11.9 MPa a flexión y 84.4 MPa a compresión.

Después de analizar las gráficas del hormigón arquitectónico referencia y los hormigones con sus respectivas adiciones se observa su gran comportamiento mecánico, siendo la resistencia a compresión muy superior respecto a la resistencia a flexión.

Los valores iniciales de los ensayos a los tres días adquieren valores en un rango muy similar, en días posteriores cada adición tiene diferente comportamiento mecánico hasta llegar a su valor final.

En la mayor parte de ensayos se observa que la mayor resistencia tanto en flexión como compresión se la obtiene de los 3 a los 7 días, posterior a ello la resistencia crece, aunque detenidamente.

Análisis comparativo de la resistencia a flexión a los 3, 7 y 28 días de los hormigones con sus respectivas adiciones.

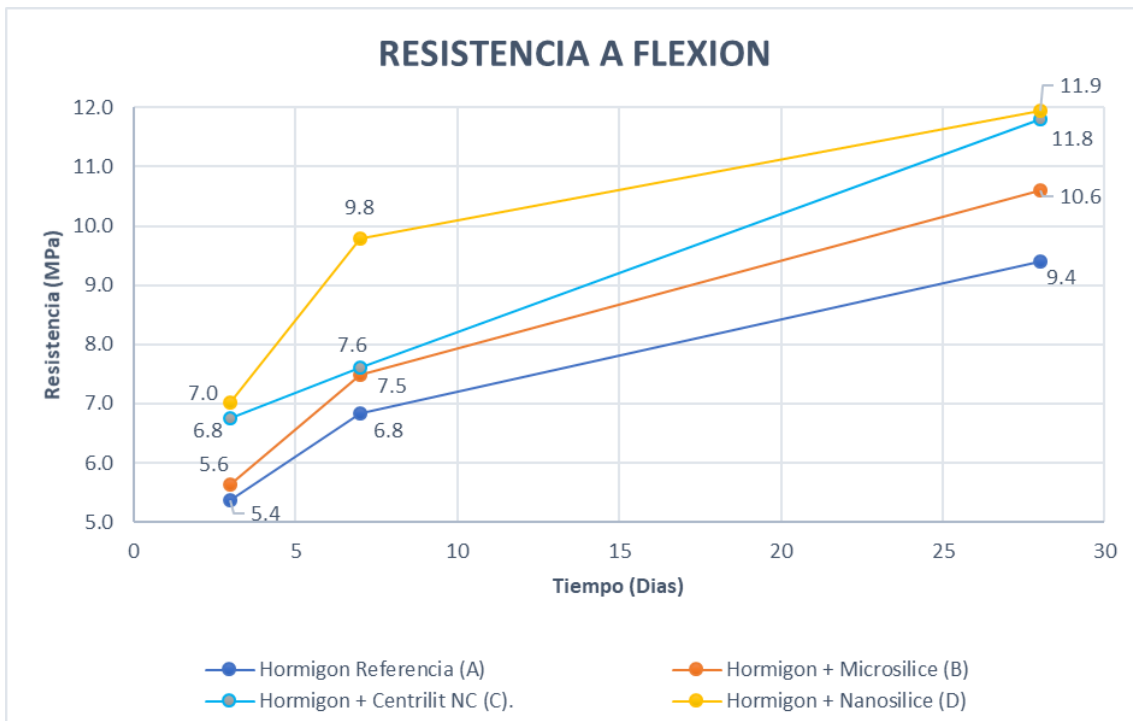


Figura 35: Resistencia a flexión de hormigones y sus respectivas adiciones.



En los resultados se observa que tanto el hormigón arquitectónico referencia como los hormigones con sus respectivas adiciones han obtenido una gran resistencia inicial. Las adiciones puzolánicas han cumplido su objetivo desde los tres primeros días, si se comparan los resultados el hormigón referencia, inicia con una resistencia a flexión de 5.4 MPa. Mientras que el hormigón con nanosílice ha alcanzado los 7.0 MPa.

A los 7 días el hormigón arquitectónico con microsilíce y Centrilit nc, poseen valores muy similares, 7.5 MPa y 7.6 MPa respectivamente, mientras que la resistencia a flexión del hormigón con nanosílice ha ascendido radicalmente hasta llegar a los 9.8 MPa. superando a todos los demás hormigones.

A los 28 días cuando la resistencia de los hormigones llega a su punto máximo se observa que los valores del Nanosílice y del Centrilit han alcanzado una resistencia mecánica similar de 11.9 MPa y 11.8 MPa respectivamente. Superando notoriamente al hormigón referencia que alcanzó los 9.4 MPa.

La resistencia de los hormigones ha crecido progresivamente, excepto el del nanosílice que muestra una resistencia inicial muy superior a los demás, ya que a los 7 días a alcanzado el 80% de su resistencia total.

Análisis comparativo de la resistencia a compresión a los 3, 7 y 28 días de los hormigones con sus respectivas adiciones.

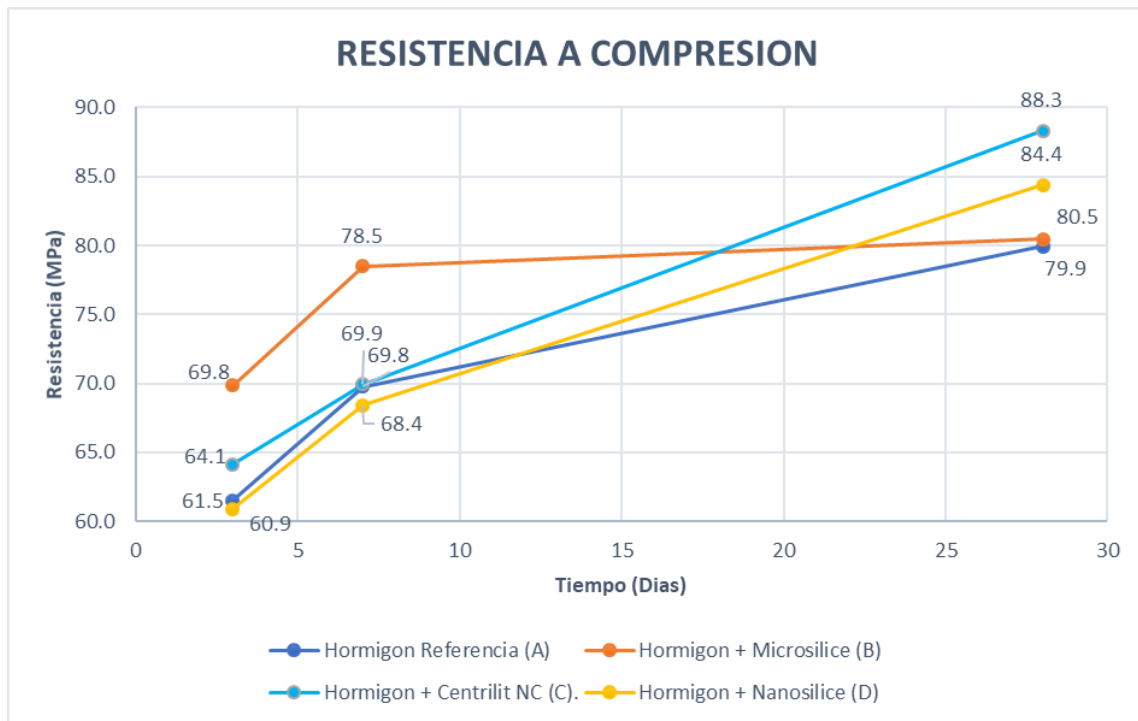


Figura 36: Resistencia a compresión de hormigones y sus respectivas adiciones.

En los resultados de resistencia a compresión se observa que el rango a los 3 días es muy similar entre el nanosílice y el hormigón referencia, mientras que el hormigón con microsilíce ha alcanzado una gran resistencia inicial superando a los demás.

A los 7 días la resistencia de los hormigones es muy similar excepto la del microsilíce que ha superado notablemente a las demás. Llegando hasta los 78.5 MPa.

A los 28 días cuando los hormigones han ganado su máxima resistencia, se obtiene que todos han crecido progresivamente, excepto el caso del hormigón con microsilíce que mostro poco crecimiento.

Esto demostró como el hormigón con microsilíce gano la mayor resistencia a compresión a los 7 días después de ello la resistencia incremento detenidamente hasta llegar a su valor final.

### 6.3 Resultados propiedades físicas obtenidos:

#### 6.3.1 Porosidad:

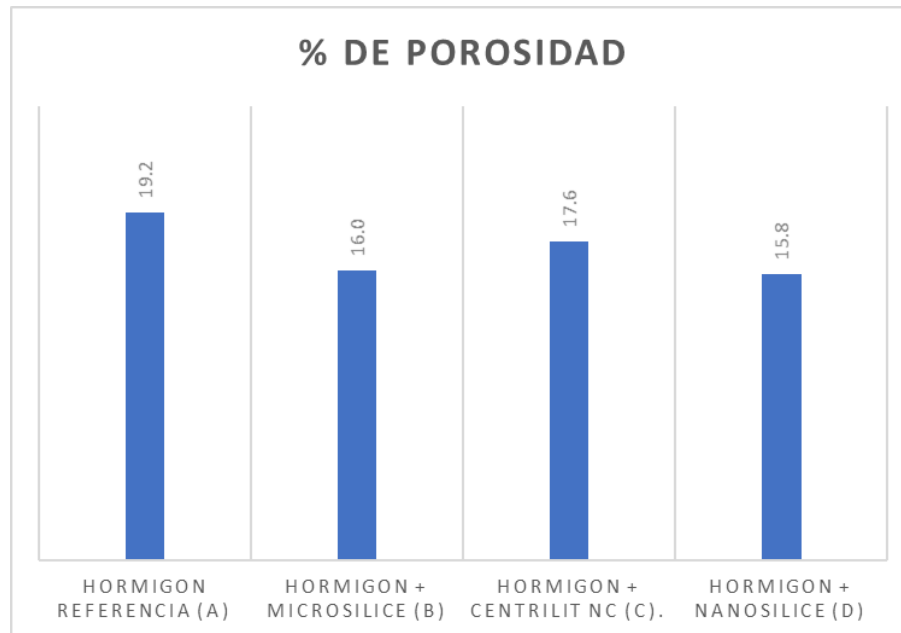
Muestra	Peso Hidrostático (gr)	Peso Saturado (gr)	Peso Seco (gr)	Densidad Aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad Relativa (gr/cm <sup>3</sup> )
Hormigón Referencia (A)	120.3	267.8	244.7	2.03	2.52
Hormigón + Microsilíce (B)	120.4	275.7	256.4	2.13	2.54
Hormigón + Centrilit NC (C).	126.4	280	257.8	2.04	2.47
Hormigón + Nanosilíce (D)	129.5	290.8	270.4	2.09	2.48

Tabla 12: Resultados de medición de pesos

Muestra	%
Hormigón Referencia (A)	19.2
Hormigón + Microsilíce (B)	16.0
Hormigón + Centrilit NC (C).	17.6
Hormigón + Nanosilíce (D)	15.8

Tabla 13: % de porosidad.

Cuadro de porcentaje de porosidad obtenido:



*Figura 37: Comparación porcentaje de porosidad*

Después de los ensayos se obtiene que los resultados de porosidad entre los distintos hormigones poseen valores muy próximos, la mayor porosidad la tiene el hormigón referencia (19.2%), seguido del Hormigón + Centrilit (17.6%) después el Hormigón con Microsílice (17.6%) y el que registro menor porosidad es el Hormigón + Nanosílice (15.8%).

### 6.3.2 Desorción:

Desorción del hormigón referencia

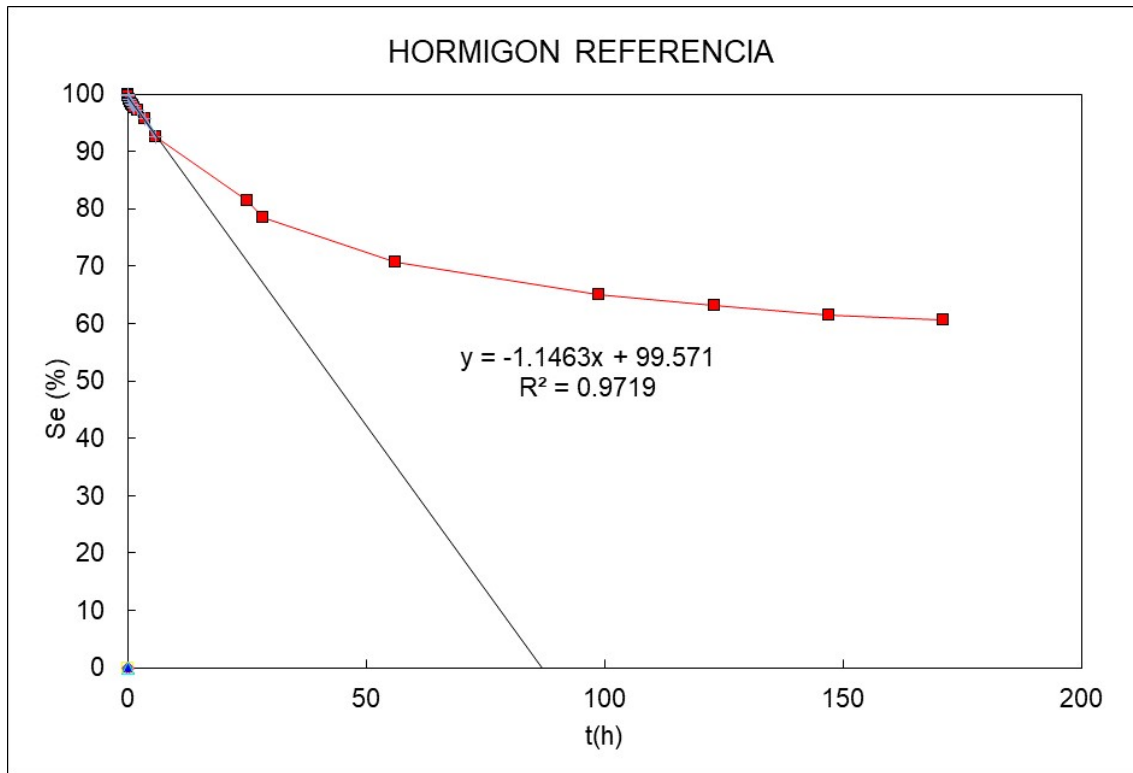


Figura 38: Desorción del hormigón referencia

Después de realizar los pesajes en un periodo de 170 horas, se analiza el porcentaje de saturación que posee la probeta en los distintos tiempos.

En el grafico se observa la recta tangente generada cuando la  $R^2$  se acerca a 1, en este caso la pendiente genero gran inclinación con los primeros valores.

Con la gráfica se obtiene que el coeficiente de evaporación es de 1.14, y después de 170 horas, en las cuales se tomaron las diferentes mediciones, el grado de saturación final es de 60.60%.

Para el hormigón referencia los resultados muestran que la mayor pérdida de agua fue en las primeras horas, posteriormente la probeta perdió agua con mucha dificultad, el proceso de perdida fue lento, después de los 7 días la probeta únicamente perdió el 39.4% de su peso saturado.

### Desorción del hormigón + Microsílice.

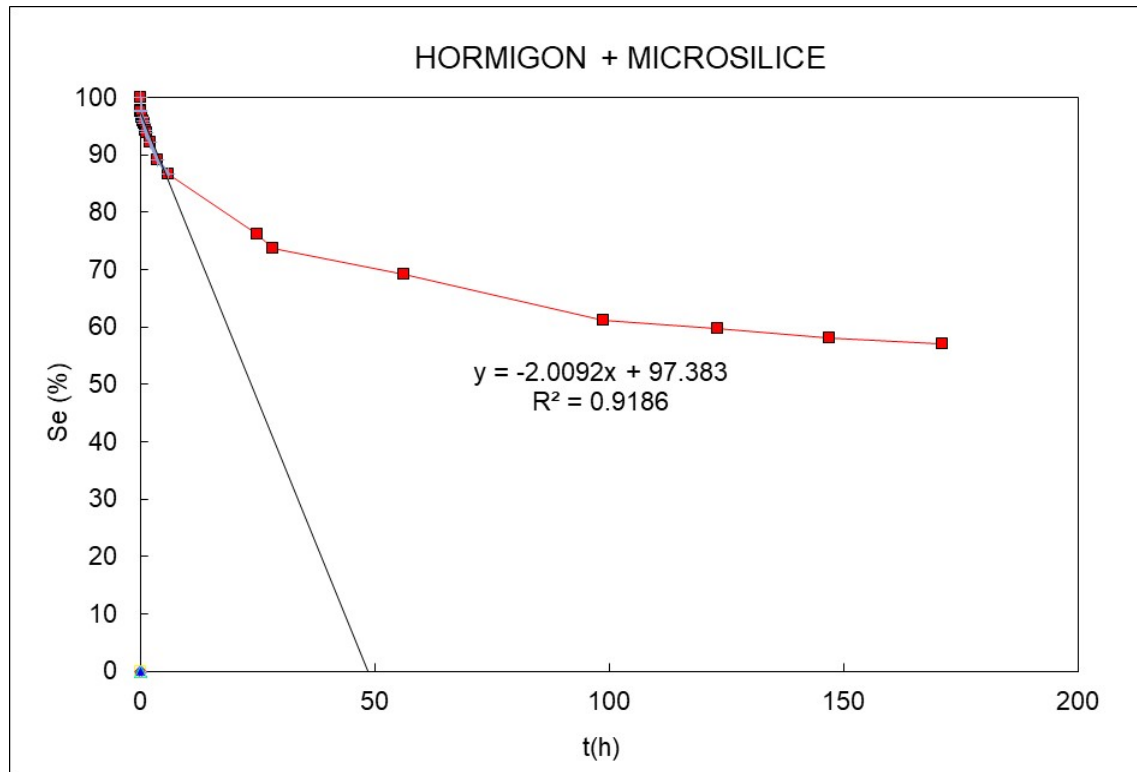


Figura 39: Desorción del hormigón + microsilice.

En el gráfico se observa la pendiente generada cuando la  $R^2$  se acerca a 1, la pendiente genera gran inclinación con los primeros valores.

Con la gráfica se obtiene que el coeficiente de evaporación es de 2.0, y después de 170 horas, el grado de saturación final es de 56.90 %

El coeficiente de evaporación indica que en las primeras horas la probeta perdió agua más rápido que el hormigón referencia. Posteriormente el proceso de evaporación fue lento.

Finalizado el ensayo la probeta únicamente perdió el 43.10 % de su peso saturado.

El porcentaje de saturación después de los 7 días es alto, lo que sugiere que la estructura capilar no se encuentra conectada.

Desorción del hormigón + Centrilit Nc.

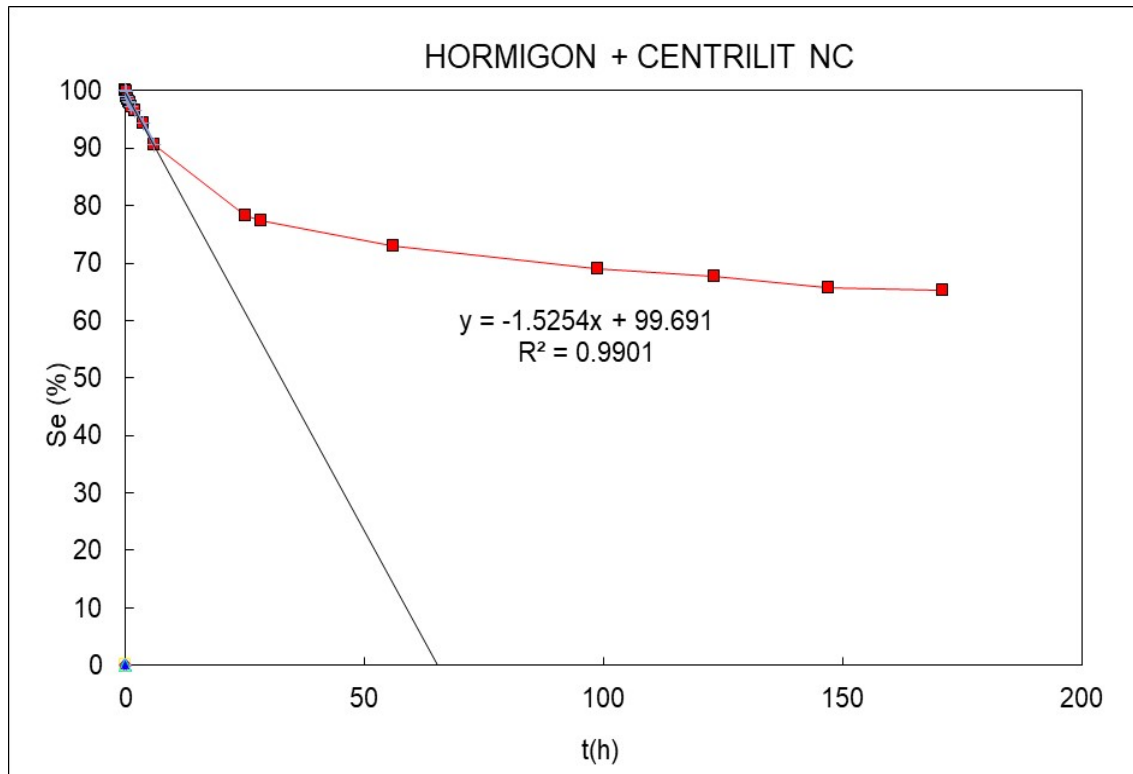


Figura 40: Desorción del hormigón + Centrilit Nc

En el gráfico se observa la pendiente generada cuando la  $R^2$  se acerca a 1, la pendiente genera gran inclinación con los primeros valores.

Con la gráfica se obtiene que el coeficiente de evaporación es de 1.52, y después de 170 horas, en las cuales se tomaron las diferentes mediciones, el grado de saturación final es de 65.31 %

Para el hormigón + Centrilit nc los resultados muestran que la mayor pérdida de agua fue en las primeras horas, posteriormente el agua evapora lentamente.

Después de los 7 días la probeta únicamente perdió el 34.69 % de su peso saturado.

## Desorción del hormigón + Nanosílice.

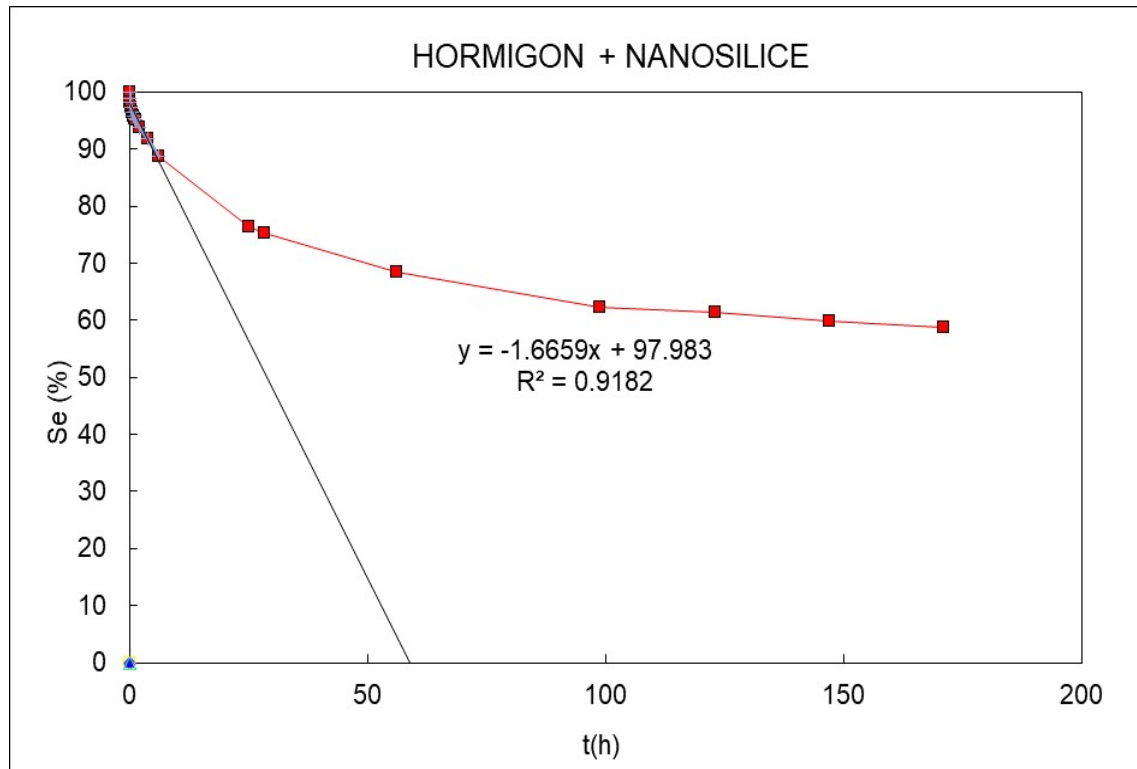


Figura 41: Desorción del hormigón + Nanosílice.

En el gráfico se observa la pendiente generada cuando la  $R^2$  se acerca a 1, la pendiente genera gran inclinación con los primeros valores.

Con la gráfica se obtiene que el coeficiente de evaporación es de 1.66, y después de 170 horas, el grado de saturación final es de 58.82 %

Para el hormigón + Nanosílice los resultados muestran que la mayor pérdida de agua fue en las primeras horas, posteriormente la probeta perdió agua con mucha dificultad, después de los 7 días la probeta únicamente perdió el 41.18 % de su peso saturado.

El ensayo determina como en los 4 materiales el % de saturación es muy alto, con lo cual se puede decir que los poros no se encuentran conectados, razón por la cual el agua tiene dificultad para evaporar.

### 6.3.3 Absorción Capilar

Absorción capilar del hormigón referencia

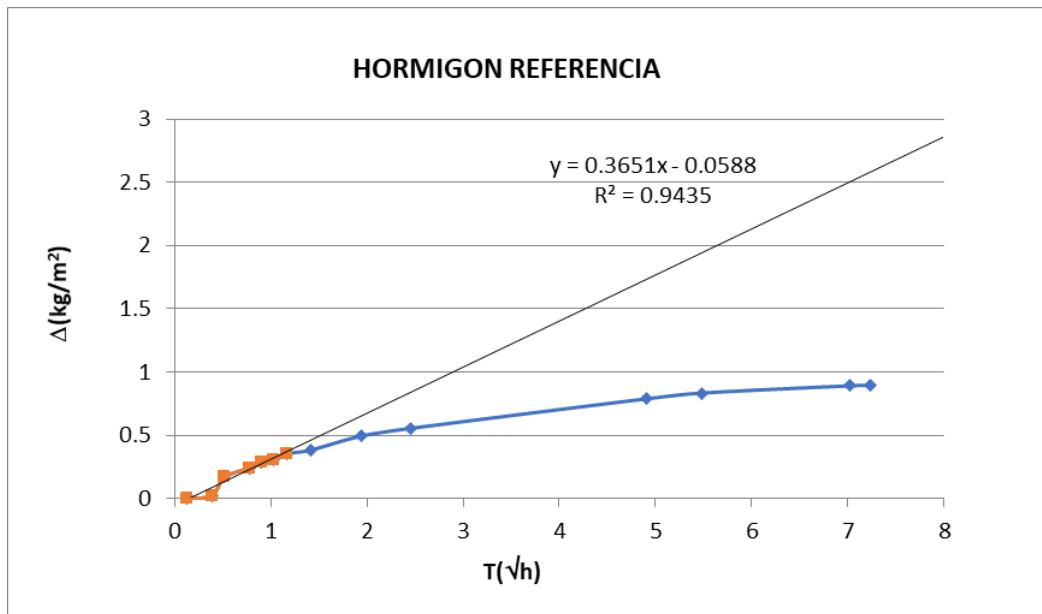


Figura 42: Absorción capilar del hormigón referencia

Después de realizar los pesajes en un periodo de 170 horas aproximadamente, se analiza el peso que la probeta gana a medida que el tiempo pasa.

Si se analiza el proceso de ganancia de peso, se observa que en las primeras horas es cuando la probeta más gana, a medida que el tiempo transcurre la ganancia de peso es mínimo. Después de las 170 horas se detuvo la medición puesto que la probeta empezó a perder su peso.

En la figura se observa la recta tangente generada cuando la R se acerca a 1, mientras más inclinada es la recta, más rápida ha sido la succión capilar, con lo cual se puede decir que mientras más inclinada es la recta más fino es el radio del poro.

El ensayo determino que para el hormigón referencia el coeficiente de absorción capilar es de 0.36.



Absorción capilar del hormigón + Microsílice.

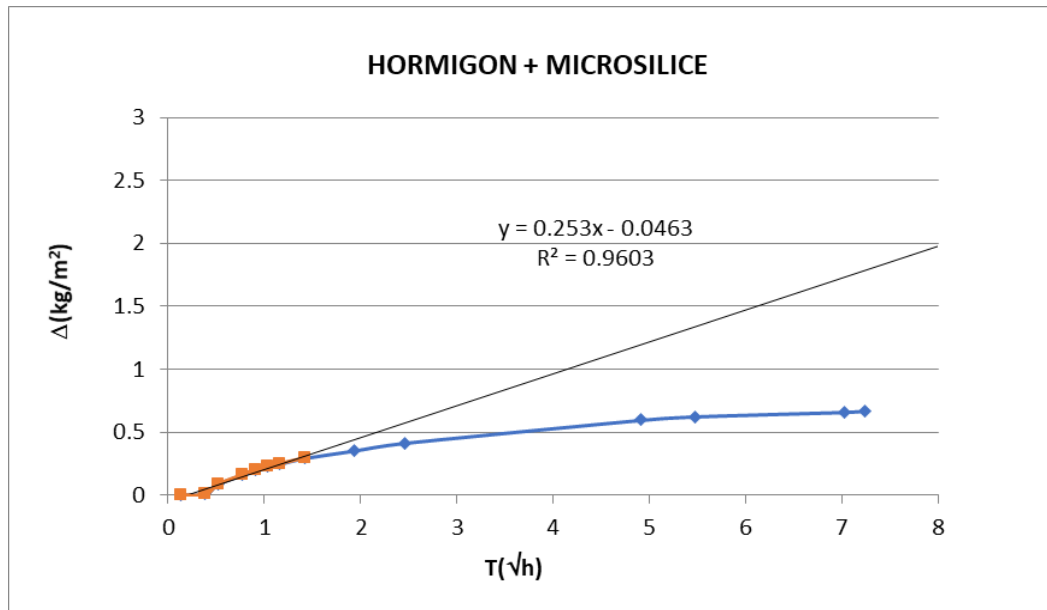


Figura 43: Absorción capilar del hormigón + Microsílice.

Si se analiza el proceso de ganancia de peso durante las 170 horas aproximadamente, el hormigón + microsílice sigue la tendencia anterior gana peso durante las primeras horas, posteriormente la ganancia es mínima.

El ensayo determino que su coeficiente de absorción capilar es de 0.25.

Absorción capilar del hormigón + Centrilit Nc

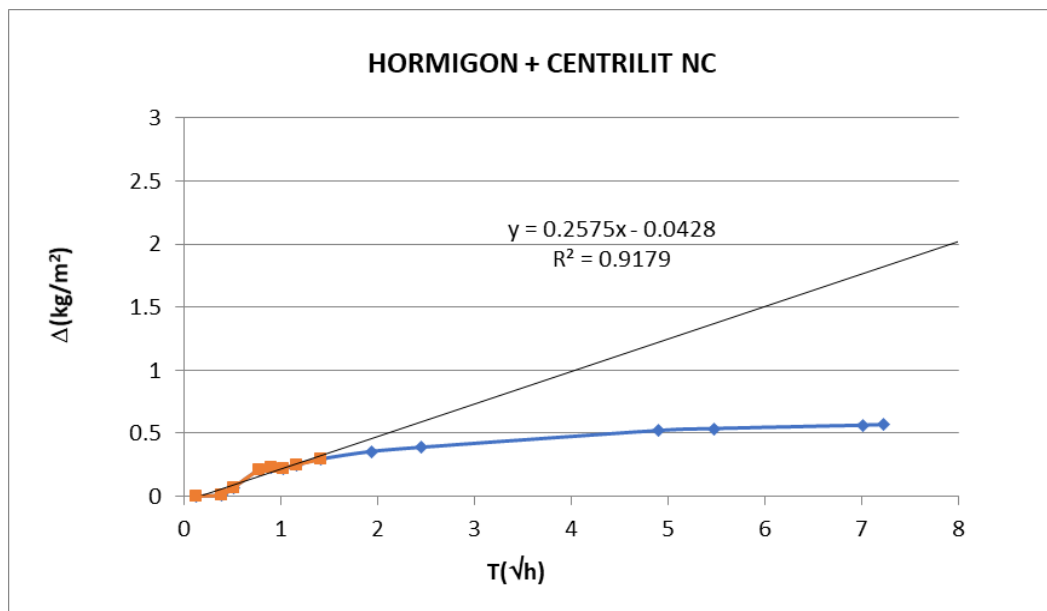


Figura 44: Absorción capilar del hormigón + Centrilit Nc.

Si se analiza el proceso de ganancia de peso durante las 170 horas, el hormigón + Centrilit Nc sigue la tendencia anterior gana peso en las primeras horas, después la ganancia es mínima.

Después de las 170 horas la probeta empieza a perder peso, por consecuente, se detiene el ensayo.

El ensayo determino que el coeficiente de absorción capilar es de 0.25

Absorción capilar del hormigón + Nanosílice.

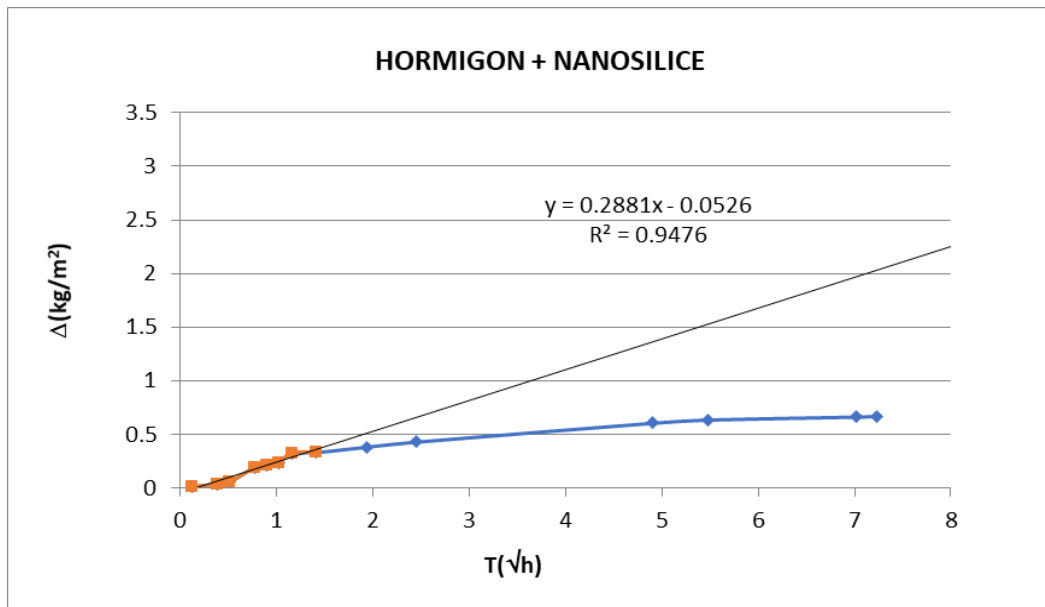


Figura 45: Absorción capilar del hormigón + Nanosílice.

Finalizado el pesaje durante el periodo de 170 horas, se determina que el Hormigón + Nanosílice sigue la tendencia de los anteriores materiales, gana peso en las primeras horas y después su ganancia es mínima.

El ensayo determino que el coeficiente de absorción capilar es de 0.28

Mientras mayor es el coeficiente de absorción menor es la finura del poro. Mientras más fino es el poro el agua asciende más rápido.

Finalizado el análisis de los 4 materiales se puede observar que su comportamiento es similar, los resultados son muy equivalentes, de tal manera que el estudio no genera una respuesta comparativa.

En los 4 materiales la succión capilar fue muy similar por lo que no se puede distinguir que material posee un menor o mayor radio de poro.

Análisis de absorción capilar de probetas de hormigón.



*Figura 46: Absorción capilar de hormigón referencia y hormigón + adiciones*

El análisis visual de las probetas reafirma los resultados obtenidos, a las 170 horas cuando el ensayo de absorción capilar se detuvo. Se observa que el agua no logra ascender por los poros de las probetas, se deduce que la mayor ganancia de peso se generó en las primeras horas cuando el agua inicio humectando las paredes externas de las probetas, posteriormente la red capilar se encuentra desconectada, lo que dificulta que el agua ascienda por los vasos capilares.

#### **6.4 Resultados Análisis Químico (Cristalización de sales):**

Hormigón referencia:



24 horas



15 días

Después de 24 horas en las cuales la probeta estuvo parcialmente sumergida en sulfato se observa que en la zona frontal las sales empiezan a cristalizar, después de los 15 días las sales han cristalizado significativamente en la zona media alta sin llegar a la parte superior.

#### Hormigón + Microsílice



24 horas



15 días

En la probeta de hormigón + microsílice se observa que a las 24 horas no existe indicios de cristalización, después de los 15 días la cristalización es densa y se concentra en la parte media inferior. En la zona superior la probeta no ha generado cambios.

#### Hormigón + Centrilit Nc.



24 horas



15 días

En la probeta de hormigón + Centrilit Nc los resultados son bastante similares al anterior, a las 24 horas no existe indicio de cristalización, posteriormente a los 15 días existe una cristalización significativa en la zona media inferior. En la zona superior la probeta no presenta cambios.

### Hormigón + nanosílice



24 horas



15 días

En la probeta de hormigón + nanosílice se observa que a las 24 horas no existen muestras de cristalización, a los 15 días la cristalización es mínima, se observa una ligera cristalización en la zona media inferior.

Cristalización de sales en probetas de hormigón:



**Referencia.**

**Microsílice.**

**Centrilit Nc.**

**Nanosílice.**

*Figura 47: Cristalización de sales, 30 días de ensayo*

Después de los 30 días se puede analizar el frente de evaporación de las diferentes probetas, la cristalización de sales se produce donde el agua está evaporando, con lo cual se puede determinar cómo es la red capilar de cada probeta.

La red capilar de la probeta de hormigón referencia es la mejor conectada, la cristalización se ha producido hasta la zona superior.

La red capilar de la probeta de hormigón + microsílíce no está conectada, lo que ha impedido que el agua ascienda hasta la zona superior, toda la evaporación ha ocurrido en la zona media inferior.

En la probeta de Hormigón + Centrilit Nc la red porosa está conectada, la evaporación ha ocurrido desde la zona inferior hasta la superior.

Finalmente, en la probeta de hormigón + nanosílíce la red capilar no está conectada las sales han cristalizado en la zona media inferior, la parte superior se encuentra limpia, la red porosa ha impedido que el agua ascienda hacia la parte superior.

### 6.5 Análisis Sustitución de cemento por adiciones puzolánicas:

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de la formulación del hormigón arquitectónico original (sin ninguna adición), se obtienen probetas con las siguientes dosificaciones y se las ensaya a flexión y compresión a 3, 7 y 28 días.

HORMIGON ORIGEN	
Cemento	3 kg
Arena	3 kg
Agua	660 ml
Superplastificante	0.036 kg

*Tabla 14:* Dosificación del hormigón arquitectónico original

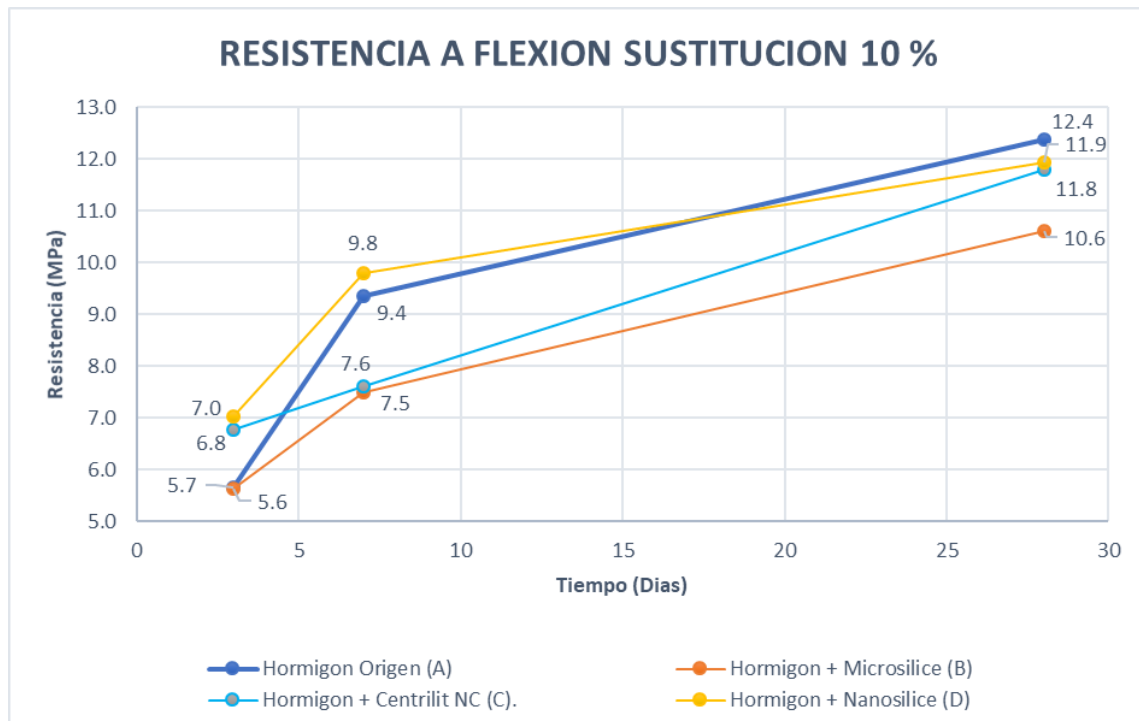
- La dosificación original presenta el 50% de cemento y el 50% de árido.
- La cantidad de aditivo superplastificante utilizado es la del 1.2 % sobre el peso del cemento.
- La relación agua / cemento es de 0.22

Con los resultados se consigue comparar la resistencia mecánica el hormigón arquitectónico original con los resultados previamente obtenidos de probetas con adiciones puzolánicas.

Con estas dosificaciones se consigue analizar el reemplazo del 10% de cemento por las respectivas puzolanas.



Cuadro comparativo resistencia a flexión, sustitución 10 %:



*Figura 48: Resistencia a flexión, sustitución 10 %*

Se observa que sustituyendo el 10% de cemento por el material puzolánico, a los 3 días la resistencia a flexión del hormigón + Nanosílíce y el hormigón + Centrilite son ligeramente superiores a la formulación del hormigón original.

Posteriormente a los 7 días, la formulación original gana resistencia superando considerablemente al hormigón + microsilíce y al hormigón + Centrilite, sin embargo, se observa que el hormigón + nanosílíce aun supera ligeramente a la formulación original.

A los 28 días se observa como el hormigón origen ha superado ligeramente a todos los hormigones con sus distintas adiciones. Llegando hasta los 12.4 MPa.

Reemplazando el 10 % de cemento por adiciones puzolánicas no se obtiene alcanzar la resistencia de la formulación original a los 28 días, sin embargo, los resultados de las adiciones puzolánicas no decepcionan, generan un buen resultado, aproximándose muy cerca a los resultados del hormigón original.

Cuadro comparativo resistencia a compresión, sustitución 10 %:

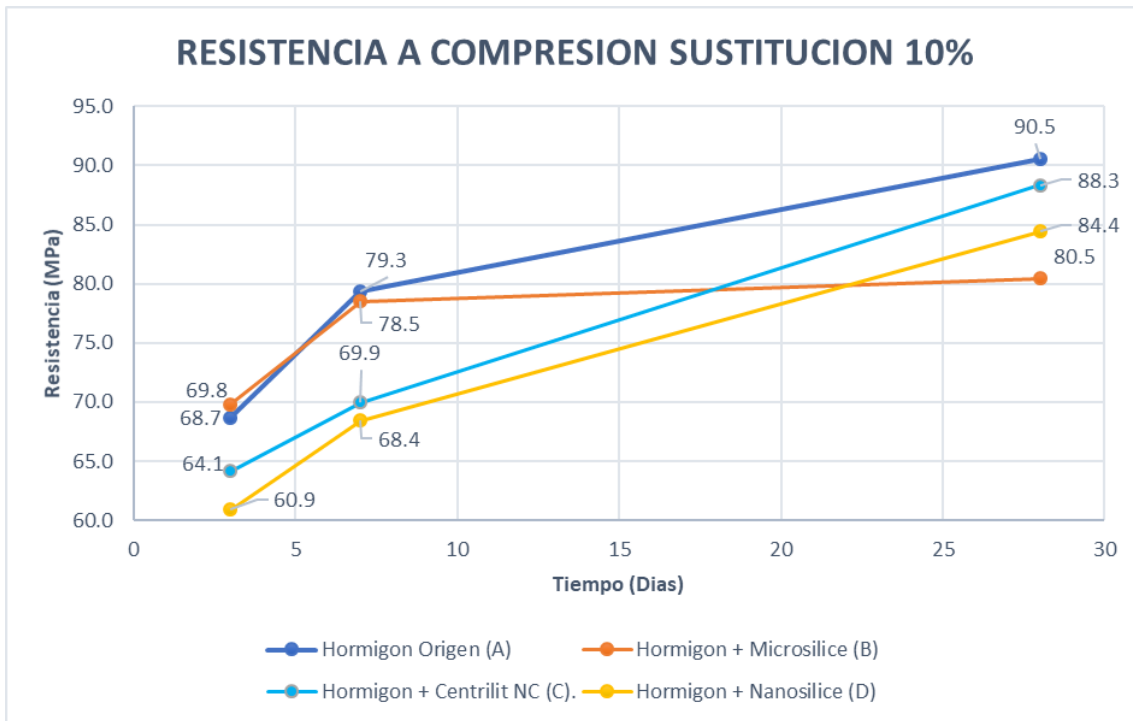


Figura 49: Resistencia a compresión, sustitución 10 %

Se observa que sustituyendo el 10% de cemento por adiciones puzolánicas, la resistencia a compresión a los 3 días la formulación del hormigón + Microsilíce y la del hormigón origen obtienen valores muy similares.

A los 7 días la resistencia del hormigón origen ya es superior a las resistencias de los hormigones con puzolanas. Sin embargo, la resistencia del hormigón + microsilíce es muy próximo.

Posteriormente el hormigón + Microsilíce gana poca resistencia mientras que la del hormigón origen supera a todas las demás adiciones llegando a los 90.5 MPa a los 28 días.

A pesar de que el hormigón referencia supera la resistencia mecánica de los demás hormigones, los resultados de las adiciones son muy próximos.



## **7 CONCLUSIONES.**

En el transcurso de este trabajo se han comparado adiciones puzolánicas con dos formulaciones diferentes, en la primera formulación denominada referencia se adiciono un 10% de adición puzolánica, manteniendo la misma cantidad de cemento, mientras que en la segunda denominada origen se sustituyó un 10% de cemento por adición puzolánica.

En el primer caso en el que las adiciones puzolánicas se añadieron al cemento se observa un aumento de resistencia a flexión a todas las edades y para todas las adiciones, este aumento es muy pronunciado, alrededor del 44% a los 7 días para la formulación con nanosílice, y de aproximadamente un 25% a los 28 días para las formulaciones con adiciones nanométricas. (Nanosílice y Centrilit Nc). La resistencia a compresión también aumenta, pero no de manera tan marcada.

Para el segundo caso en el cual se sustituyo un 10% de cemento por adiciones puzolánicas no se consiguió superar la resistencia mecánica de la formulación origen, sin embargo, los resultados obtenidos muestran que las adiciones nanométricas permiten obtener valores de resistencia a flexión y compresión cercanos a la formulación denominada origen.

La adición de Nanosílice demostró alta resistencia a flexión a edades tempranas, ideal para la utilización en proyectos en los cuales se requiera gran resistencia en poco tiempo. Los resultados demostraron que con la adición de nanosílice el hormigón gana el 80% de su resistencia a los 7 días.

En el ensayo de porosidad podemos confirmar como con la utilización de adiciones puzolánicas y la utilización de nanopartículas influye directamente en la disminución de la porosidad en las probetas, la hidratación del cemento mejora, rellenando los pequeños huecos existentes y generando una matriz más densa, la cual no permite la penetración de agua al interior de la probeta.

El ensayo demostró una pequeña, pero disminución de porosidad de las probetas con adiciones puzolánicas, lo cual genera mayor impermeabilidad de la probeta evitando la entrada de agentes agresivos y por ende genera una mayor durabilidad del hormigón.

La porosidad con la adición de microsílice disminuyo 16.6%, con el Centrilit Nc disminuyo el 8.33% y con la nanosílice disminuyo un 17.7% con respecto al hormigón referencia

Las formulaciones con adiciones puzolánicas presentan una disminución del coeficiente de absorción capilar respecto a la formulación de referencia. Esto está relacionado con variaciones en la red porosa que dificultan la succión de agua por parte de los hormigones que contienen adiciones. Generalmente esta menor tendencia a absorber agua se relaciona con una mayor durabilidad del hormigón, ya que dificulta el paso de sustancias disueltas en el agua como cloruros o sulfatos.

La red porosa está directamente ligada a la resistencia, la matriz densa generada por puzolanas permite la disminución de la porosidad y por ende el incremento de la resistencia.

Un aspecto interesante para futuros estudios sería evaluar el comportamiento mecánico a edades superiores a 28 días, ya que las adiciones puzolánicas pueden continuar actuando a edades avanzadas.

## 8 REFERENCIAS.

- [1] Miguel Angel Gutierrez Fernandez. Hormigones de altas prestaciones. revista de edificación: teoría y técnicas de la edificación. Vol 15. septiembre 1993, p 71-78. ISSN: 0213-8948.
- [2] Escofet.Slimconcrete Escofet. [En línea]. Escofet 1886 S.A, 2019. [Consulta: 20 febrero 2019]. Disponible en <https://www.escofet.com/productos/urban-life>
- [3] Construmat. Barcelona Building Construmat. [En línea]. Fira Internacional de Barcelona. 2019 [Consulta: 20 febrero 2019]. Disponible en <http://www.construmat.com/premios-bbb-construmat-2015>
- [4] Lurdes Laura Morejón Salup, (2015). "Morteros de cemento con adiciones de humo de sílice y nanosílice" Tesis de Máster, Escuela técnica superior de ingenieros de caminos canales y puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- [5] Stylios G.K., (2013) "There is plenty of room at the bottom, R.P. Feynman", International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 25 Issue: 5
- [6] Sonia Maritza Henao Duque. (2010). Nanotecnología. Journal de ciencia e ingeniería. Vol 02. No. 2. Agosto 2010. p 7- 14.-
- [7] Cristina Salgado Fernández (2010). Estudio de la actividad puzolánica de micro/nanosílice y su aplicación en hormigones de altas resistencias. Tesis de especialidad. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España
- [8] Alcaraz Marín, J. (2012). Microestructura del hormigón. Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación, (Proyecto final de carrera), 227. Recuperado de <http://repositorio.upct.es//handle/10317/2863>
- [9] P. Kumar Metha, Paulo J.M. Monteiro, Concrete: Microstrucutre, Properties and Materials, octubre 2001

[10] Elkem. Ficha tecnica del producto [En linea]. Elkem ASA 2019 [Consulta: 10 marzo 2019]. Disponible en <https://www.elkem.com/silicon-materials/construction/concrete/elkem-microsilica-powder/>

[11] SpainMC - Centrilit NC. (n.d.). ficha técnica del producto. [En linea]. SpainMC [Consulta: 15 marzo 2019]. Retrieved from <https://www.mc-bauchemie.es/~media/Files/MC-Bauchemie/Products/es-ES/Technical Datasheet/Centrilit NC Suspension.pdf>

[12] Basf. MasterRoc MS 685 Suspensión de nanosílice precipitada. CAMPO DE APLICACIÓN. (2017). Retrieved from [www.master-builders-solutions.basf.es](http://www.master-builders-solutions.basf.es)

N.Gangadharan .Kanniyappan. N.Rishinath. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology: Effect of Centrilit NC on Strength & Durability of Concrete. Vol 3. Issue 7. Julio 2016. p 610- 614. ISSN: 2348 – 7968

Roland Stulz y Kiran Mukerji. Materiales de construcción apropiados: Catálogo de soluciones potenciales revisada edición ampliado. SKAT & IT Publications. J. Reiser, C. Dominguez. SKAT Switzerland 1993. ISBN 3 908001 55 2

Jorge I. Tobon, Jordi Paya, Oscar J.Restrepo. Study of durability of Portland cement mortars blended with silica nanoparticles. Elsevier: Construction and Building materials. Vol 80. enero 2015, p92- 97. ISSN 0950-0618

Mauricio López, José Tomás Castro. Revista Ingeniería de Construcción: Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo. Vol. 25 N°3. Diciembre 2010. p 419-431. ISSN 0718 5073

Jorge Iván Tobón. Oscar Restrepo Baena. Jorge Paya Bernabéu. Adición de nanopartículas al cemento portland. Dyna. Julio 2007. p 277-291. ISSN 0012-7353

M.O. Valcuende. C. Parra. J. Benlloch. Materiales de construcción: Permeabilidad, porosidad y resistencia de hormigones autocompactables. Vol.55. N°280. Mayo 2015. p17-25. ISSN 0465- 2746

Néstor Eduardo León Brito, (2012). "Influencia de la adición de nanosílice en el hormigón autocompactante", Tesis de Máster, Escuela técnica superior de ingenieros de caminos canales y puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Anahí López. Ciencia y tecnología de los materiales: Atlas del hormigón arquitectónico:  
Resultados preliminares de los aspectos estéticos obtenidos con moldes de madera.  
Revista. N° 5. 2015. p45-57. ISSN 2250-5989

## 9 ANEXOS:

Hormigón Referencia:

Hormigón Referencia (A)					
3 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo A1	Ensayo A2	Ensayo A1-1	Ensayo A1-2	Ensayo A2-1	Ensayo A2-2
258	235	11170	11400	11250	11050
7 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo A1	Ensayo A2	Ensayo A1-1	Ensayo A1-2	Ensayo A2-1	Ensayo A2-2
449	405	13500	12090	12930	14330
28 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo A1	Ensayo A2	Ensayo A1-1	Ensayo A1-2	Ensayo A2-1	Ensayo A2-2
560	551	15570	16550	12360	16050

*Anexo 1: valores obtenidos del ensayo/ hormigón tradicional.*

Hormigón + adición de microsilíce.

Hormigón + Microsilíce (B)					
3 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo B1	Ensayo B2	Ensayo B1-1	Ensayo B1-2	Ensayo B2-1	Ensayo B2-2
209	281	11660	11270	11990	10690
7 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo B1	Ensayo B2	Ensayo B1-1	Ensayo B1-2	Ensayo B2-1	Ensayo B2-2
378	274	12910	13030	12890	12440
28 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo B1	Ensayo B2	Ensayo B1-1	Ensayo B1-2	Ensayo B2-1	Ensayo B2-2
424	499	13380	13950	12850	12370

*Anexo 2: valores obtenidos del ensayo/ hormigón + microsilíce*

Hormigón + adición de Centrilit nc.

Hormigón + Centrilit NC (C).					
3 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo C1	Ensayo C2	Ensayo C1-1	Ensayo C1-2	Ensayo C2-1	Ensayo C2-2
288	301	10690	10340	10360	10500
7 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo C1	Ensayo C2	Ensayo C1-1	Ensayo C1-2	Ensayo C2-1	Ensayo C2-2
340	323	11420	10870	11770	11620
28 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo C1	Ensayo C2	Ensayo C1-1	Ensayo C1-2	Ensayo C2-1	Ensayo C2-2
525	502	15410	15000	13070	14200

Anexo 3: valores obtenidos del ensayo/ hormigón + Centrilit nc.

Hormigón + adición de Nanosílice

Hormigón + Nanosílice (D)					
3 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo D1	Ensayo D2	Ensayo D1-1	Ensayo D1-2	Ensayo D2-1	Ensayo D2-2
293	257	9520	10540	10040	9590
7 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo D1	Ensayo D2	Ensayo D1-1	Ensayo D1-2	Ensayo D2-1	Ensayo D2-2
606	593	10610	11590	11980	12120
28 DIAS					
FLEXION (kg)		COMPRESION (kg)			
Ensayo D1	Ensayo D2	Ensayo D1-1	Ensayo D1-2	Ensayo D2-1	Ensayo D2-2
397	499	13810	14050	12750	14500

Anexo 4: valores obtenidos del ensayo/ hormigón + nanosílice